



Trabajo de fin de máster

Estudio del comportamiento estructural de construcciones de tierra:
La técnica constructiva Earthbag

Apellidos: Trigo Salas
Nombre: Tania Alejandra
Titulación: Máster en Sostenibilidad

Directores: Miren Etxeberría Larrañaga
Gabriel Barbeta Solá

Data de lectura: Junio 2015



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH

Institut Universitari de Recerca en Ciència
i Tecnologies de la Sostenibilitat

*Debes amar la arcilla que va en tus manos
debes amar su arena hasta la locura
y si no, no la emprendas que será en vano
sólo el amor alumbra lo que perdura
sólo el amor convierte en milagro el barro*

Silvio Rodríguez

Agradecimientos

Un muy sincero agradecimiento a mis tutores Miren Etxeberría y Gabriel Barbeta por su disponibilidad, conocimientos, sabiduría y apoyo entregados durante el desarrollo de este trabajo y por ser quienes me han abierto el camino hacia el apasionante mundo de la construcción vernácula.

A Pere Bellvehí, encargado del laboratorio de la Universidad de Girona, que durante toda la fase experimental me brindo su apoyo y ayuda incondicional.

A Francesc Massó por facilitarme sus investigaciones y el material de relleno para los ensayos realizados, sin su ayuda y aporte este trabajo no habría sido posible.

A mi familia, que desde la distancia siempre han estado presentes apoyándome, guiándome y entregándome los valores para ser quien soy.

A mis amigos, compañeros y a todos quienes se han cruzado por mi vida, entregándome su compañía, cariño y sonrisas, haciendo más dulce y alegre cada día.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	3
ÍNDICE DE FIGURAS.....	6
ÍNDICE DE TABLAS.....	9
LISTADO DE SÍMBOLOS	10
1. CAPITULO I. INTRODUCCIÓN.....	11
1.1. ASPECTOS GENERALES Y MOTIVACIÓN	11
1.2. OBJETIVOS.....	11
2. CAPITULO II. ESTADO DEL ARTE.....	12
2.1. INTRODUCCIÓN	12
2.2. LA TIERRA COMO MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN.....	13
2.3. CONSTRUCCIÓN EARTHBAG.....	15
2.3.1. <i>Materiales y herramientas</i>	16
2.3.1.1. Materiales principales	16
2.3.1.2. Materiales secundarios	21
2.3.1.3. Herramientas	21
2.3.2. <i>Geometría y Diseño</i>	22
2.3.3. <i>Fases de la construcción</i>	24
2.4. INVESTIGACIONES EXISTENTES	26
3. CAPITULO III . TEORÍA.....	29
3.1. RESISTENCIA A COMPRESIÓN	29
3.2. RESISTENCIA AL CORTE	31
4. CAPITULO IV. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	33
4.1. PROGRAMA DE ENSAYO.....	33
4.1.1. <i>Material utilizado</i>	33
4.1.2. <i>Ensayo de sedimentación</i>	38
4.1.3. <i>Preparación de la muestra</i>	41
4.2. ENSAYO DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN.....	44
4.3. ENSAYO DE RESISTENCIA AL CORTE.....	44
4.3.1. <i>Método 1</i>	44
4.3.2. <i>Método 2</i>	46
5. CAPITULO V. ANÁLISIS DE RESULTADOS	48

5.1.	ENSAYO DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN.....	48
5.2.	ENSAYO DE RESISTENCIA AL CORTE.....	51
6.	CAPITULO VII. CONCLUSIÓN	54
6.1.	TRABAJO FUTURO.....	55
7.	CAPITULO VI. BIBLIOGRAFÍA	56
8.	ANEXO.....	57
8.1.	ENSAYO DE SEDIMENTACIÓN (SEDIMENTOMETRÍA).....	57
8.2.	ENSAYO COMPRESIÓN NO CONFINADA	60

Índice de Figuras

Figura 1: Arquitectura de Tierra en el mundo. <i>Fuente:</i> www.craterre.org	12
Figura 2: Ciudad de Shibam, Yemen. <i>Foto:</i> By Will de Freitas/ <i>Fuente:</i> http://www.flickr.com	13
Figura 3: Construcción Eco-Dome Cal-Earth. <i>Fuente:</i> http://www.calearth.com	15
Figura 4: Curva granulométrica de un suelo arcilloso (arriba Izq.), uno arenoso (arriba Der.) y uno limoso (abajo). <i>Fuente:</i> Minke (1994).	17
Figura 5: Ensayo de sedimentación. <i>Fuente:</i> Minke G. (1994).....	18
Figura 6: Ensayo de caída de Bola. Las muestras poseen contenidos de humedad que varían de 10 a 20 por ciento. <i>Fuente:</i> Hunter & Kiffmeyer (2004).	18
Figura 7: Ensayo de cohesión. <i>Fuente:</i> Minke (1994).....	19
Figura 8: Rollo de bolsa de polipropileno para cortar a medida en construcción earthbag. <i>Fuente:</i> Hunter & Kiffmeyer (2004).	19
Figura 9: Colocación de alambre de espinos en hileras paralelas. <i>Fuente:</i> http://www.earthbagbuilding.com	20
Figura 10: Ejemplo del uso moldes con forma de arco para la abertura de una puerta. <i>Fuente:</i> http://www.earthbagbuilding.com	21
Figura 11: Fuerza resultante en el arranque de bóvedas y cúpulas (Izq.). Regla del medio tercio para el diseño y cálculo de bóvedas y cúpulas (Der.) <i>Fuente:</i> Minke (1994)	22
Figura 12: Compas central (C) y de altura (H) para el ejecución y replanteo de cúpula earthbag. <i>Fuente:</i> Khalili (2008).	23
Figura 13: Proceso de ejecución de muros proyecto Earthbag Bon Mati, Girona. <i>Fuente:</i> Autor.	25
Figura 14: Ensayo de corte (Izq) y Resultados (der). <i>Fuente:</i> Pelly (2010).	27
Figura 15: Gráfico Tensión v/s Deformación para las diferentes muestras, Ensayo de Tracción. <i>Fuente:</i> Vadgama (2010)	28
Figura 16: Diagramas de cuerpo libre de earthbag. Modelo rectangular (izq.) y modelo semi-circular (der.). <i>Fuente:</i> Vadgama (2010).....	29
Figura 17: Envolvente de falla Mohr-Coulomb para earthbag, donde $\sigma_v > \sigma_h$	30
Figura 18: Diagrama de cuerpo libre, análisis pila de altura infinita para Earthbag. <i>Fuente:</i> Pelly (2010).	31
Figura 19: Envolvente de falla Mohr-Coulomb que muestra el efecto de la estabilización con cemento, $\sigma_v > \sigma_h$. <i>Fuente:</i> Vadgama (2010).	31
Figura 20: Modo de fallo teórico del alambre de espino bajo corte directo. a) Vista general b) Falla por flexion c) Falla cortante cuerpo rígido. <i>Fuente:</i> Vadgama (2010).....	32

Figura 21: Ubicación de la finca de extracción de la muestra, Santa Coloma del Farnes, Girona. <i>Fuente:</i> Massó (2013).	33
Figura 22: Tabla comparativa de colores: muestra de tierra Santa Coloma del Farnes y arcillas caolinita e illita. <i>Fuente:</i> Massó (2013)	34
Figura 23: Curva Granulométrica por lavado, tamizado y secado, partículas $\geq 80 \mu\text{m}$ (UNE 103 101:1995). <i>Fuente:</i> Massó (2013).	35
Figura 24: Curva Granulométrica de las partículas $< 80 \mu\text{m}$. (Ensayo de sedimentación). <i>Fuente:</i> Massó F. (2013).	36
Figura 25: Sedimentometría; preparación de la muestra 50 g $< 80 \mu\text{m}$. <i>Fuente:</i> Autor.	39
Figura 26: Sedimentometría; materiales de ensayo (Izq.) y Agitación manual de la probeta (Der.). <i>Fuente:</i> Autor.	40
Figura 27: Sedimentometría; toma de lecturas con el densímetro. <i>Fuente:</i> Autor.	40
Figura 28: Curva Granulométrica de las partículas $< 80 \mu\text{m}$. (Ensayo de sedimentación). <i>Fuente:</i> Autor.	41
Figura 29: Esquema representativo testigo earthbag de ensayo. <i>Fuente:</i> Autor.	42
Figura 30: Preparación del material de relleno para testigos earthbag. <i>Fuente:</i> Autor.	43
Figura 31: Preparación de los testigos de earthbag: forma de cierre y apisonado. <i>Fuente:</i> Autor.	43
Figura 32: Ensayo compresión no confinada: pila de dos sacos con alambre de espinos. <i>Fuente:</i> Autor.	44
Figura 33: Montaje ensayo de resistencia al corte, Método 1 (Propuesta). <i>Fuente:</i> Autor.	45
Figura 34: Imagen donde se muestra el fallo producido por el ensayo de resistencia al corte, Método 1 (Propuesta). <i>Fuente:</i> Autor.	46
Figura 35: Montaje ensayo de resistencia al corte con espino (Método 2). <i>Fuente:</i> Autor.	47
Figura 36: Disposición de alambre de espino, ensayo de resistencia al corte (Método 2). <i>Fuente:</i> Autor.	47
Figura 37: Carga aplicada v/s Desplazamiento pila 2-bolsas, sin estabilizar. Ensayo compresión no confinada.	48
Figura 38: Carga aplicada v/s Desplazamiento pila 2-bolsas, estabilizadas. Ensayo resistencia a compresión no confinada.	49
Figura 39: Modo de falla de las probetas earthbag. Ensayo resistencia a compresión no confinada.	49
Figura 40: Deformación de la platina superior durante el ensayo de resistencia a compresión.	50
Figura 41: Ensayo de corte entre dos probetas earthbag con alambre de espino en el interfaz de las bolsas.	52

Figura 42: Modo de fallo al corte para probetas Earthbag para configuración con alambre de espinos.....	52
Figura 43: Fuerza de fricción v/s Fuerza normal, muestras sin estabilizar (sin espino).	53
Figura 44: Fuerza de fricción v/s Fuerza normal, muestras sin estabilizar (Con espino).	53
Figura 45: Fuerza de fricción v/s Fuerza normal, muestras estabilizadas (sin espino).....	53
Figura 46: Resultado ensayo difracción de rayos X (DRX). <i>Fuente: Masso et al (2014).</i>	59

Índice de Tablas

Tabla 1: Propiedades físicas de la muestra de suelo de Santa Coloma de Farnes. <i>Fuente:</i> Massó (2013).	34
Tabla 2: Granulometría por lavado, tamizado y secado, partículas $\geq 80 \mu\text{m}$. (UNE 103 101:1995). <i>Fuente:</i> Massó F. (2013).	35
Tabla 3: Ensayo sedimentación partículas $< 80 \mu\text{m}$. (Sedimentometría). <i>Fuente:</i> Massó (2013).	36
Tabla 4: Distribución granulométrica total. Combinación del ensayo granulométrico por lavado, secado y tamizado y la Sedimentometría. <i>Fuente:</i> Massó (2013).	37
Tabla 5: Ensayo sedimentación partículas $< 80 \mu\text{m}$. (Sedimentometría). <i>Fuente:</i> Autor.	40
Tabla 6: Distribución granulométrica total. Combinación del ensayo granulométrico por lavado, secado y tamizado y la Sedimentometría. <i>Fuente:</i> Autor.	41
Tabla 7: Programa de ensayo a cortante. <i>Fuente:</i> Autor.	46
Tabla 8: Resultados Ensayo resistencia a compresión no confinada para sistemas 2-sacos Earthbag.	49
Tabla 9: Resumen de resultados, Ensayo de corte.	51
Tabla 10: Profundidad efectiva L. <i>Fuente:</i> Barbeta (2002).	57
Tabla 11: Valores de K para el cálculo del diámetro de la partícula D (Ley de Stock). <i>Fuente:</i> Barbeta (2002).	58
Tabla 12: Características probetas ensayo compresión confinada.	60

Listado de símbolos

A	Área de contacto entre Earthbag
B	Ancho de Bolsa en la falla
c	Cohesión efectiva
F	Fuerza vertical aplicada
H	Espesor Bolsa
K	Razón de tensiones en el suelo dentro de la earthbag
L	Longitud de la bolsa
T	Fuerza de tensión en material de la bolsa
w	Peso earthbag
P_v	Carga vertical externa aplicada
p_v	Presión vertical externa aplicada
σ_h	Esfuerzo horizontal ejercido por el suelo sobre el material de la bolsa
σ_v	Esfuerzo vertical ejercido por el suelo sobre el material de la bolsa
σ_{bag}	Esfuerzo tracción en el material de la bolsa
φ	Ángulo de rozamiento interno
μ	Coefficiente de fricción

1. CAPITULO I. Introducción

1.1. Aspectos generales y motivación

La llamada globalización neoliberal desplegada en las últimas cuatro décadas, ha articulado un desarrollo desigual a nivel mundial, generando una polarización económica, social y política entre regiones, lo que se ha traducido en un empobrecimiento de las condiciones de vida y trabajo de la mayoría de la población. Este hecho, ha conllevado a una creciente necesidad de viviendas de bajo costo en todo el mundo, ya no tan solo en los países del sur, sino que también en los países del norte donde producto de las especulaciones del mercado, la gran mayoría de la sociedad civil no puede acceder con facilidad a una vivienda de propiedad (Barbeta, 2002).

Esta situación nos plantea la necesidad de hacer un cambio de mentalidad y empezar a apostar por un nuevo modelo de construcción más consciente, asequible y respetuoso del entorno. La técnica constructiva Earthbag, es una alternativa innovadora a esta problemática, por su sostenibilidad inherente, su simplicidad constructiva y bajo costo (sólo se requiere de material de relleno, sacos de polipropileno y mano de obra calificada o no calificada).

Desafortunadamente, como señala Daigle (2008), la técnica constructiva Earthbag ha sido desarrollado en los últimos treinta años bajo conocimiento anecdótico, no siendo acompañado de esfuerzos para estudiar el material de una manera cuantitativa consistente como otros materiales de ingeniería estructural, lo que sumado a la inexistencia de normativa establecida, hace más dificultoso poder establecer una práctica de diseño que este validada por la comunidad científica.

Si bien, en la última década los estudios de Daigle (2008), Pelly (2010) y Vadgama (2010) han contribuido a la base de conocimiento sobre el comportamiento estructural de las viviendas Earthbag, todavía queda mucho por investigar para alcanzar el objetivo de hacer de las estructuras Earthbag una solución viable y eficiente.

Con el fin aportar al conocimiento del comportamiento de las construcciones Earthbag, en este trabajo se analizan las características estructurales de este tipo construcciones, mediante ensayos experimentales en laboratorio para determinar la resistencia a compresión y cortante del mismo.

1.2. Objetivos

General

Estudiar de las características estructurales de construcciones con sacos de tierra (Earthbag), mediante un análisis experimental de la resistencia a compresión y corte.

Específicos

Obtener resultados que sean científicamente válidos y coherentes con el comportamiento que se esperaría de una construcción real con la técnica del Earthbag.

Aportar con este estudio al establecimiento futuro de una práctica de diseño o normativa, para la implantación en España de un nuevo modelo de construcción más económico y sostenible, como lo es la construcción con sacos de tierra.

2. CAPITULO II. Estado del Arte

2.1. Introducción

La tierra ha sido el material tradicional predominante en la construcción desde tiempos remotos, Las construcciones con barro datan de hace más 9000 años. En Turquestan, región histórica de Asia Central, fueron descubiertas viviendas de tierra del periodo de 8000- 6000 a.C. Las civilizaciones antiguas utilizaron la tierra no solo para la construcción de viviendas sino que también en la edificación de obras religiosas y fortalezas. Actualmente, un tercio de la población, habita viviendas de tierra distribuidas en los cinco continentes.



Figura 1: Arquitectura de Tierra en el mundo. *Fuente:* www.craterre.org

En la era moderna, la construcción industrializada basada en materiales como el ladrillo, hormigón y acero, no ha podido solventar las necesidades de hábitat de los países del sur, por lo que la tierra ha continuado siendo el material preponderante de construcción gracias a su disponibilidad, bajo coste y facilidad de manejo, que posibilita la autoconstrucción. Sin embargo, a finales del siglo XX, países en desarrollo con acelerado crecimiento económico tendieron a abandonar las técnicas tradicionales de construcción con tierra, sustituyéndolas por las técnicas constructivas convencionales de Occidente importadas por las elites locales, por constituir éstas un símbolo de progreso y riqueza, pese a lo insostenible del modelo.

En los países industrializados por su parte, tras la crisis energética del petróleo en 1973, la construcción con tierra tuvo un resurgimiento producto de la desmedida explotación de los recursos naturales y las altas tasas de contaminación que generaba a su alrededor la industria de la construcción.

Actualmente, diversas son las instituciones y centros de investigación dedicados al estudio y mejoras de la calidad de las técnicas de construcción y materiales de tierra. En Francia encontramos al grupo CRAterre, Centro de Investigación y Aplicación del Material Tierra en Grenoble, el INSA, Institut National des Sciences Appliquées en Lyon y el CSTB, Centre Cientifique et du Bâtiment Técnica en Paris. En Alemania, la Universidad Católica de Kassel cuenta con un grupo de investigación liderado por el profesor Gernot Minke de gran trayectoria en el estudio de la arquitectura de tierra. En Estados Unidos encontramos el Instituto de California del Arte de la Tierra y Arquitectura, Cal-Earth, fundado en 1991 por el famoso arquitecto iraní-estadounidense Nader Khalili.



Figura 2: Ciudad de Shibam, Yemen. Foto: By Will de Freitas/ Fuente: <http://www.flickr.com>

2.2. La Tierra como material de construcción

El material tierra, proviene de la desagregación de la roca madre, producto de procesos de transformación físicos, químicos y mecánicos a la que se ve sometida con el tiempo. Su composición variara en función del sitio de extracción y podrá ser tratada de diversas maneras.

Se denomina barro a la mezcla de tierra arcillosa, el cual toma diferentes nombres según la aplicación. Se utiliza el término de bloques de barro o *adobe* a los bloques de tierra arcillosa hechos a mano, cuando se habla de bloques comprimidos se emplea el término bloques de suelo, ladrillo crudo se denomina al bloque no cocido moldeado en una ladrillera, y Tapial, a la tierra compactada o apisonada.

Actualmente, existen muchos prejuicios sobre la construcción con tierra debido a la falta de información en general, lo que sumado a los intereses económicos y políticos de la industria de la construcción, han contribuido al desprestigio y pérdidas de técnicas locales de construcción con tierra cruda en muchas regiones del mundo. Para muchos resulta difícil comprender que un material natural como la tierra no necesite ser procesado y que en muchos casos, la excavación de cimientos proporcione un material que pueda ser utilizado directamente para construir.

En comparación con los materiales de construcción convencionales como el hormigón, el ladrillo y el acero, el barro presenta varias ventajas:

Inercia térmica

El barro posee una gran capacidad de almacenar calor y retornarla posteriormente. Permite balancear el clima interior de las viviendas en zonas climáticas con oscilaciones de temperaturas amplias entre el día y la noche, como por ejemplo en climas áridos desérticos.

Aislamiento acústico

Los muros de tierra son una eficaz barrera a los ruidos indeseados, debido a que transmiten mal las vibraciones sonoras.

Regula la Humedad Ambiental

Las paredes de tierra tienen la capacidad de absorber y liberar la humedad del ambiente más rápido y en mayor cantidad que los materiales convencionales de construcción, manteniendo durante todo el año una humedad óptima de 50%. Estudios realizados en la Universidad de Kassel, Alemania, revelaron que cuando la humedad relativa en un ambiente interior aumenta súbitamente de 50 a 80%, los bloques de barro pueden absorber 30 veces más humedad que ladrillos cerámicos en un periodo de dos días (Minke, 1994).

Sostenibilidad

La tierra, es un material inocuo totalmente reutilizable y reciclable. Puede ser reducido mediante la trituración a su estado original y ser depositado o reutilizado sin generar perjuicios al medio ambiente.

A su vez, el barro ahorra energía ya que para su preparación, transporte y trabajo *in situ* sólo se requiere de un 1 % de la energía que se necesita para el proceso de generación y transporte de piezas cerámicas o hormigón armado.

Disponibilidad

La tierra es un material fácil de obtener localmente, prácticamente cualquier tipo de tierra es útil para construir, cuyas propiedades pueden ser mejoradas con la adhesión de algún estabilizante u otro material si así lo requiriese el proyecto constructivo (cal, cenizas, paja, cascara de arroz, etc.).

Idóneo para la autoconstrucción

La construcción con tierra es una técnica sencilla que no requiere de mano de obra especializada, por lo que resulta apropiada para que cualquier persona pueda ser partícipe del proceso constructivo. Sólo se requerirá de la presencia de una persona experimentada en la materia para que controle y dirija el proyecto.

Por su parte, el barro presenta tres desventajas en comparación con los materiales industrializados comunes que se deben tener en consideración a la hora de utilizarla como material de construcción.

Material no estandarizado

La composición de la tierra varía en función del lugar de donde se extrae, pudiendo contener diferentes cantidades y tipos de arcilla, limo, arena y agregados. De este modo, para la preparación correcta de la mezcla es necesario estudiar la composición específica del barro que se dispone a fin de conocer sus características y modificarlas con aditivos si fuese necesario.

Alta retracción

La mezcla de barro requiere de agua para su manipulación y para activar la capacidad aglomerante de la arcilla durante el amasado, pudiendo producirse fisuras al secarse. La retracción lineal durante el secado oscila entre 0,4 y el 2% en técnicas con mezclas secas (tapial o bloques compactados) y entre 3 y 12% para técnicas con tierra húmeda (como las que se utilizan para morteros y bloques de barro).

Material no impermeable

El barro debe ser protegido de las inclemencias del clima como la lluvia, nieve o heladas especialmente en estado húmedo y de la humedad ascendente del suelo. Para su protección, se

debe incluir aleros, barrera de protección horizontal desde los cimientos, barreras impermeabilizantes o algún tratamiento de superficies.

Vista las ventajas y desventajas de la tierra como material de construcción podemos ver el valor de la tierra como material de construcción, no solo pensado para autoconstrucción sino que también para la construcción industrializada, dada su economía, viabilidad, sostenibilidad y principalmente por sus propiedades de inercia térmica y aislamiento acústico que permiten proporcionar un mayor confort, estética y armonía a las instalaciones.

2.3. Construcción Earthbag

La construcción con Earthbag (sacos de tierra) conocida también como superadobe es una forma sencilla de construcción basada en sacos de arpillera o polipropileno rellenos de cualquier material granular estabilizados o no de acuerdo con la aplicación particular, los cuales se compactan en posición horizontal, generando hiladas que se superponen y unen entre ellas mediante alambre de espino, estacas de madera o de bambú. Este método de construcción está basado en los principios de la arquitectura tradicional, como la geometría del arco, combinado con materiales y tecnología actual, que ofrece gracias a la forma geométrica de diseño edificaciones auto resistentes, integradas y respetuosas con el medio ambiente.

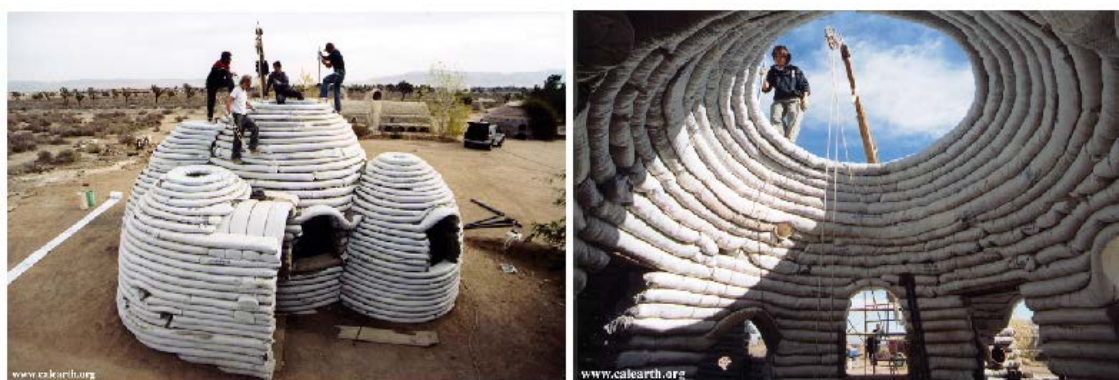


Figura 3: Construcción Eco-Dome Cal-Earth. *Fuente:* <http://www.calearth.com>.

Su origen, se remonta al siglo XVII, cuando el sistema se utilizaba para fortificar las defensas militares. Durante la Segunda Guerra Mundial, fueron utilizados como construcciones temporales, trincheras y búnkeres. Dada su versatilidad y simpleza, el uso de Earthbag se ha extendido a otros campos, tales como la de sistemas de contención de tierras y de protección de inundaciones. En el área de la geotecnia, donde se conocen como soilbags, se utilizan para controlar asentamientos y aumentar la resistencia del suelo (Xu *et al*, 2008).

El uso de los sacos de tierras en estructuras de pequeña escala, que en este trabajo se hace referencia como “Earthbag”, comenzó a desarrollarse en la década de los 70, de la mano del arquitecto Gernot Minke quien lideraba las investigaciones en Laboratorio de Construcciones Experimentales (FEB, pos sus siglas en alemán) de la Universidad de Kassel, Alemania. Los estudios llevaron a la realización de tres proyectos, el primero de ellos consistente en una cúpula realizada con mangueras de poliéster relleno de tierra arenosa. El segundo sistema se basaba en una vivienda prototipo de bajo costo para zonas con riesgo sísmico, construida en el campo de experimentos del FEB en 1978, para la cual se utilizó un tejido de yute protegido por varias manos de pintura de cal. Este sistema fue aplicado en una construcción realizada en Guatemala el mismo año (Minke, 1994).

Por su parte, en la década de los 80, el arquitecto Nader Khalili, comienza a trabajar por encargo de la NASA en un prototipo de vivienda Earthbag para asentamientos en Marte o en la Luna, donde el único material disponible es la tierra. Tras el estudio, se percata del gran potencial del sistema constructivo, y tras asociarse con las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) y la

Oficina del Alto Comisionado para los Refugiados (ACNUR), comienzan a aplicar los Earthbag para refugios de emergencia. En 1991, con la fundación del Instituto Cal-Earth, Khalili continua desarrollando, investigando y difundiendo la técnica impartiendo de cursos de enseñanza de Earthbag.

En los últimos 30 años, gracias a diversos discípulos de Khalili como Donald Kiffmeyer, Kelly Hart y Owen Geiger entre otros y a las nuevas tecnologías de la información como internet, ha sido posible la expansión del sistema a lo largo del mundo.

2.3.1. Materiales y herramientas

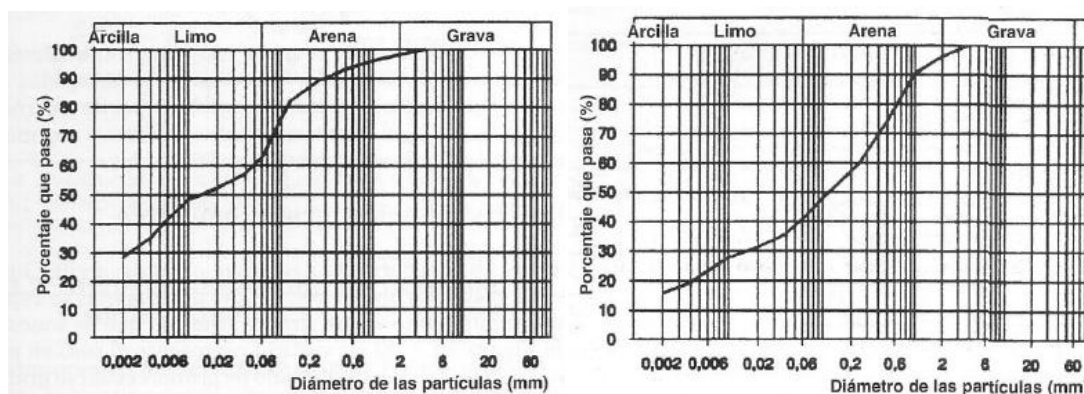
2.3.1.1. Materiales principales

Como señalamos anteriormente, el sistema de construcción Earthbag es una técnica simple de construcción que depende básicamente de cuatro materiales: la tierra (relleno granular), los sacos, alambre de espinos y madera.

• Tierra

La tierra es el elemento fundamental de la construcción Earthbag. Lo más razonable es utilizar como material de relleno el de la propia excavación de los cimientos, por lo que la composición y las propiedades de la tierra varían de un lugar a otro. Actualmente no existe claridad en como las características del suelo puedan afectar las propiedades estructurales de los Earthbag, de ahí la importancia de investigaciones que analicen este factor.

La tierra es producto de la erosión mecánica y química de las rocas en la corteza terrestre. De acuerdo con la distribución granulométrica las partículas de suelo se dividen en grava, arena, limo y arcilla. Las partículas de grava poseen diámetros superiores a 2 mm, las arenas entre 0,06 y 2 mm, los limos van desde los 0,002 y 0,06 mm, y las arcillas son las que poseen diámetros menores a 0,002 mm. De este modo, pueden distinguirse tres tipos básicos de suelos: arenosos, arcillosos y limosos. Los suelos arenosos son permeables y su comportamiento mecánico viene dado por el peso y el rozamiento de sus partículas, ya que la resistencia depende de la proximidad de éstas entre sí. Las deformaciones derivadas de las acciones exteriores se producen con rapidez. Los suelos limosos presentan un comportamiento intermedio. Son suelos finos con poca o nula plasticidad. Finalmente, los suelos arcillosos son impermeables debido a que contienen huecos muy pequeños y retienen el agua. Su comportamiento y resistencia depende de la película de agua existente entre sus partículas y del espesor de ésta. Las deformaciones motivadas por la acción de fuerzas exteriores se producen muy despacio, ya que el paso del agua a través de los huecos es un proceso lento.



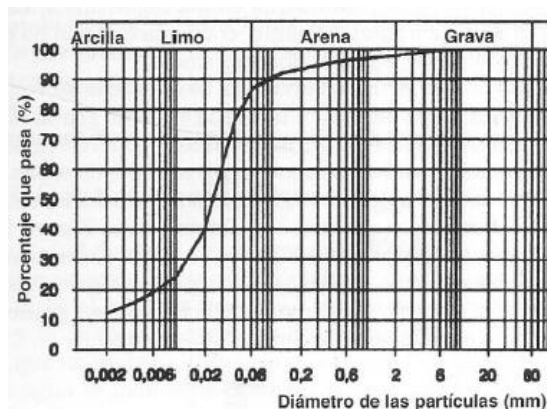


Figura 4: Curva granulométrica de un suelo arcilloso (arriba Izq.), uno arenoso (arriba Der.) y uno limoso (abajo).
Fuente: Minke (1994).

Para la construcción con tierra, la fracción de suelo compuesta de partículas de arcilla es particularmente importante, ya que la arcilla actúa como elemento de unión. Mayor contenido de arcilla resulta en una mayor cohesión, ya que los minerales de arcilla tienen cationes intercambiables que despliegan una capacidad aglutinante mayor. Sin embargo, la arcilla también muestra ciertas propiedades que son indeseables para la construcción de tierra. Específicamente, tiene una tendencia a hincharse y encogerse con contenidos altos o bajos de humedad, respectivamente. El cambio de volumen entre una arcilla saturada y seca puede variar de 100% a 2000%, dependiendo de los minerales de arcilla específicos presentes (Hunter & Kiffmeyer, 2004). Esta inestabilidad volumétrica sugiere que hay algún límite superior para el contenido de arcilla, más allá del cual el aumento de la cohesión se ven compensados por una alta inestabilidad. Actualmente, la gama óptima aceptada para el contenido de arcilla para sistemas de earthbag es entre 5% y 30% (Hunter y Kiffmeyer, 2004), sin embargo aún no existen estudios formalizados que evalúen los efectos de la distribución del tamaño de partículas en el comportamiento de las estructuras Earthbag.

En general y de acuerdo con la experiencia práctica de las construcciones Earthbag realizadas hasta la fecha, sólo con la realización de una serie de ensayos de campo que pueden efectuarse en el sitio en poco tiempo, es posible estimar y tener una idea cercana de la composición del barro con el que se cuenta, y conseguir una mezcla aceptable para los proyectos auto constructivos Earthbag. A continuación se describen dichos ensayos:

Ensayo de Olor

Esta prueba tiene por objeto identificar por su olor la presencia de materia orgánica y consiste en tomar un poco de material en estado húmedo para detectar partículas orgánicas que generalmente despiden un olor a moho.

Ensayo de la mordedura

Se toma un poco de material para ser aplastado por los dientes. Si no rechina será suelo arcilloso; si rechina pero ligeramente, es suelo limoso; si rechina desagradablemente, es arenoso.

Ensayo del color

Mediante esta prueba se puede apreciar el tipo de suelo de acuerdo con el color observado. Se tomará el material en estado seco ya que húmedo puede variar sensiblemente. Colores claros y brillantes son característicos de suelos inorgánicos. Colores castaño oscuro, verde olivo o negro, son característicos de suelos orgánicos.

Ensayo de lavado

El ensayo consiste en tomar una muestra de barro húmedo y frotarse las manos. Si las manos se sienten pegajosas y se requiere de agua para limpiarlas es indicativo de un barro arcilloso. Si las manos están pegajosas pero pueden limpiarse al frotarlas cuando se secan, nos encontramos frente a un barro limoso. Si las partículas se sienten con claridad es señal de un barro arenoso o gravoso.

Ensayo del corte

El ensayo se realiza para detectar la presencia de arcillas mediante el brillo de sus partículas. La prueba consiste en tomar un poco de material, amasarlo con agua hasta formar una bola compacta, del tamaño de la mano, se corta por la mitad para observar las superficies. Se trata de arcillas cuando las superficies son brillantes; de limos cuando son poco brillantes y arenas cuando son opacas.

Ensayo de sedimentación

Esta prueba tiene por propósito estimar la proporción de los componentes del suelo mediante la decantación. Se coge una muestra de tierra para colocarla en un embase de vidrio preferentemente. Se agrega una cantidad igual de agua, se agita y se deja reposar hasta que el agua quede clara. Las arenas decantarán primero por ser las partículas más pesadas seguidas de los limos y por último se depositarán las arcillas que son las partículas más ligeras. Sin embargo, de acuerdo con experimentos realizados en el Laboratorio de Construcciones Experimentales de la Universidad de Kassel (FEB), se puede caer en errores de hasta 1700% (Minke, 1994), por lo cual debe considerársele sólo como un ensayo orientativo.

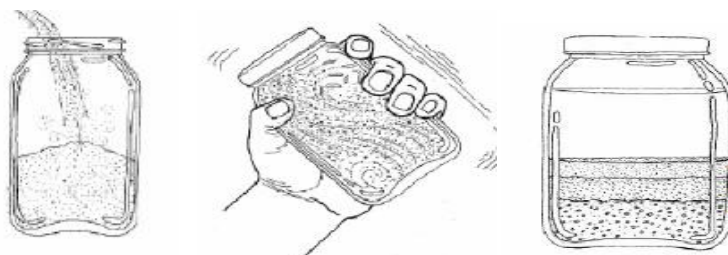
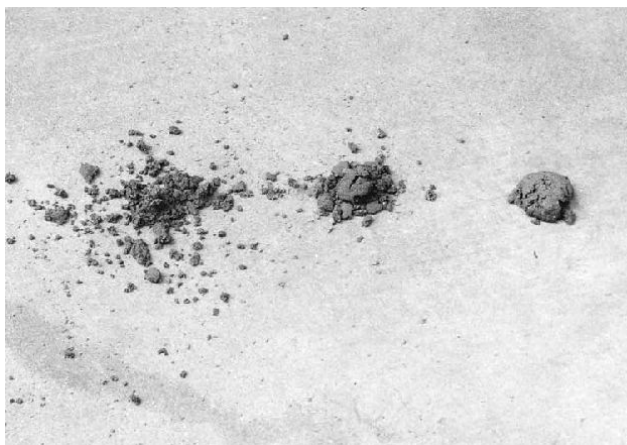


Figura 5: Ensayo de sedimentación. *Fuente:* Minke G. (1994)

Ensayo de caída de la bola



El propósito de este ensayo es determinar el contenido óptimo de humedad en el material. Se toma una muestra suficientemente húmeda y se amasa una bola de 4 cm de diámetro. Se deja caer la bola desde una altura de 1-1.5 m sobre una superficie plana. Si al caer la bola ésta se aplasta levemente o muestra muy pocas o ninguna fisura, significa que la muestra posee una capacidad aglutinante alta, que proviene de una cantidad elevada de arcilla. Si por el contrario se desmorona completamente es que tiene una cantidad muy baja de arcilla.

Figura 6: Ensayo de caída de Bola. Las muestras poseen contenidos de humedad que varían de 10 a 20 por ciento. *Fuente:* Hunter & Kiffmeyer (2004).

Ensayo de cohesión

El objetivo de este ensayo es determinar el grado de plasticidad del material. La prueba consiste en tomar una muestra de material, amasarla con agua y hacer un rollo de 3mm de diámetro sin que se parta sobre una superficie lisa. Posteriormente se alza la cinta y se la deja colgar, si ésta se rompe a una longitud mayor de 20cm, significa que la muestra tiene una alta capacidad aglutinante, implicando un contenido de arcilla demasiado alto. Si la cinta se rompe entre los 8 y 15 cm, es señal de que el suelo tiene un contenido óptimo de arcilla. En caso de romperse antes de los 8 cm, implica un suelo arenoso.

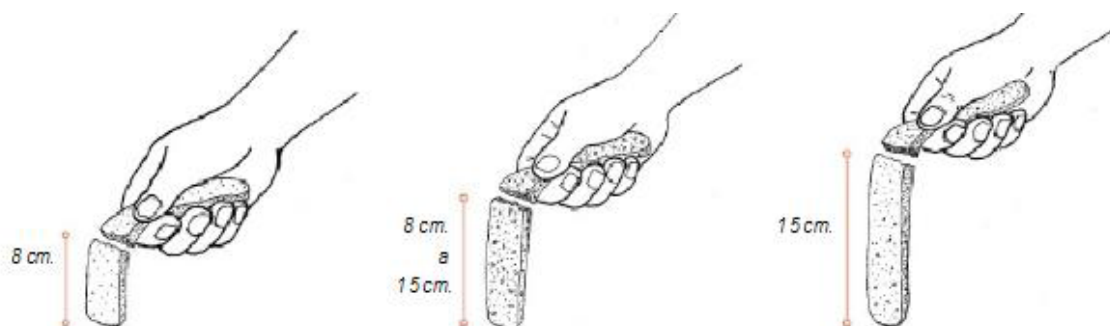


Figura 7: Ensayo de cohesión. Fuente: Minke (1994)

Ensayo de consistencia

Esta prueba sirve para determinar la relación entre la arena y la arcilla. Se forma una bola con tierra húmeda de 2 a 3 cm de diámetro. Con esta bola se forma un rollo de 3mm de diámetro. Si el rollo se parte o desarrolla grandes fisuras antes de alcanzar 3mm de diámetro la mezcla deberá ser humedecida gradualmente hasta que el rollo se parta solamente cuando haya alcanzado un diámetro de 3mm. Con esta mezcla se forma una bola nuevamente. Si no es posible formarla entonces el contenido de arena es muy alto y el de arcilla muy bajo. Si la bola se puede deshacer entre los dedos pulgar e índice con mucha fuerza, el contenido de arcilla es alto y debe rebajarse añadiendo arena. Si la bola se deshace fácilmente entonces el barro contiene poca arcilla.

- **Sacos**

En la técnica constructiva Earthbag, los sacos cumplen la función de encofrar y aportar mayor resistencia al conjunto. Ellos contienen y dan forma a la mezcla durante el proceso de llenado, compactación y secado hasta el endurecimiento. Usualmente, para éste tipo de construcciones se utilizan sacos tubulares de rafia de polipropileno con una anchura que varía de entre los 40-60 cm que se van cortando de acuerdo a los requerimientos de diseño. También pueden usarse sacos rectangulares aparejados como si fuesen ladrillos, de materiales diversos como yute, cáñamo o algodón (sacos de harina o azúcar) tradicionalmente más utilizados pero con menor resistencia y durabilidad que los de rafia de polipropileno.



Figura 8: Rollo de bolsa de polipropileno para cortar a medida en construcción earthbag. Fuente: Hunter & Kiffmeyer (2004).

La rafia de polipropileno es una fibra sintética de desarrollo relativamente reciente y de bajo costo. Posee una densidad de entre 0.90 y 0.93 g/ cm³. Es tenaz y gruesa, no se oxida, reduce la permeabilidad, es transpirable y posee una alta resistencia química a los ambientes alcalinos y ácidos.

En los ensayos realizados por Xu *et al* (2008) se determinó que la resistencia media a la tracción del material de una bolsa de polipropileno equivalente a la utilizada en la construcción Earthbag es de 23,7 kN/m, con una deformación máxima del 12,6 %.

Como desventaja del material, se tiene que el polipropileno posee una resistencia débil a los rayos UV degradándose a las 300 horas de exposición salvo estabilización o protección previa. Por este motivo es fundamental revocar la estructura, a fin de proteger los Earthbags de la degradación del medio ambiente, el cual puede ser de barro, cal o enlucidos a base de cemento (Hunter & Kiffmeyer, 2004).

- **Alambre de espinos**

Es un cordón torcido formado por dos alambres de acero galvanizado del mismo diámetro con púas de cuatro puntas enrolladas o entrelazadas en el cordón a intervalos regulares. Está compuesto por una aleación de hierro y carbono, con propiedades mecánicas que la hacen muy resistente.

Se colocan una o dos filas paralelas de alambre entre cada hilera. Después de la colocación y compactación del saco superior el alambre une las dos filas fuertemente, dando estabilidad al conjunto y otorgando mayor resistencia a los esfuerzos de tracción y al deslizamiento entre las hileras. De igual modo en las juntas y otras zonas delicadas es recomendable colocar un refuerzo de alambre.



Figura 9: Colocación de alambre de espinos en hileras paralelas. *Fuente:* <http://www.earthbagbuilding.com>

- **Madera**

La madera constituye otro de los materiales básicos en la construcción con Earthbag. Dependiendo del diseño de la edificación la madera puede tener diversos usos. Puede formar parte de la estructura tanto en pilares, vigas, cubiertas o dinteles, sobre todo en proyectos con paramentos y huecos rectos, o pueden cumplir una función meramente auxiliar en la apertura de huecos en los proyectos con muros y huecos curvos.

Si las maderas cumplen una función estructural, las piezas deben seleccionarse y dimensionarse para mantener la estructura portante. En este caso, los Earthbag se utilizarían como cerramientos dotando al conjunto de masa térmica.

En el caso de cumplir una función meramente auxiliar para la abertura de puertas y ventanas, se utilizan moldes tipo cajón de madera. Los moldes deben construirse unos centímetros más gruesos que el ancho de la pared para evitar que las bolsas lo abracen y poder retirarlos sin

dificultad e irán colocados sobre cuñas que permitan extraerlo fácilmente al finalizar el proceso. Se pueden utilizar ventanas tradicionales como las rectangulares o cuadradas, pero las ventanas en forma de arco son las más comunes para este tipo de construcciones. Para el primer caso, será necesario construir una caja con las medidas apropiadas para el proyecto y colocar un dintel que soporte las cargas. Las aberturas en forma de arco, por su parte, ofrecen mayores beneficios, ya que éstas no requieren de dintel y son las mismas bolsas de tierra las que cumplen dicha función por su propia forma. Para estas aberturas es necesario construir dos moldes distintos, uno con la parte recta de la abertura y otro con la forma del arco.



Figura 10: Ejemplo del uso moldes con forma de arco para la abertura de una puerta. *Fuente:* <http://www.earthbagbuilding.com>

2.3.1.2. Materiales secundarios

A continuación se detallan los materiales secundarios necesarios para la construcción con Earthbag.

- **Gravas:** Para la cimentación y el drenaje.
- **Lámina impermeabilizante:** Para la impermeabilización de la cimentación y los muros.
- **Tubos de PVC y cobre:** Para la conducción de instalaciones.
- **Ladrillos:** Para la formación de arquetas de saneamiento.
- **Mortero:** Para el revestimiento de la estructura.
- **Barrera de vapor:** Para evitar las condensaciones.
- **Pintura:** Para el acabado y protección del exterior e interior.
- **Solados:** Para el acabado de suelos.

2.3.1.3. Herramientas

Las herramientas requeridas para este tipo de construcciones son comunes, de fácil acceso y manejo. Estas pueden dividirse en manuales y mecánicas. A su vez, puede ser necesario si el proyecto así lo requiere, el uso de un andamio.

• Manuales

- **Cubos:** Elemento utilizado para el llenado de los sacos.
- **Pisones:** Herramienta manual usada para la compactación de los sacos.
- **Picos y Azadas:** Son instrumentos que utilizaremos para facilitar los trabajos de excavación y extracción del terreno.
- **Pala:** Herramienta de mano utilizada para excavar o mover tierra u otros materiales.
- **Carretilla:** Pequeño vehículo utilizado para el transporte de la tierra dentro de la obra.
- **Compases y estacas:** Es la herramienta principal, que guía en el trazado de la curvatura tanto horizontal como vertical del domo.
- **Plomadas y niveles:** Instrumentos para mantener la verticalidad y horizontalidad durante la ejecución de los muros.

- **Cizalla y Tijeras:** Elementos de corte para las bolsas y el alambre de púas.
 - **Paleta y llana:** Herramientas para mezclar y extender la pasta sobre las superficies guarnecidas.
- **Mecánicas**
 - **Motocultor:** Maquinaria utilizada para labrar y preparar la mezcla de tierra.
 - **Hormigonera:** Máquina empleada para la elaboración del mortero de tierra estabilizada.
 - **Excavadora:** Vehículo o maquinaria utilizada para el movimiento o extracción del terreno.

2.3.2. Geometría y Diseño

La variedad de diseños posibles con la técnica earthbag es amplia, sin embargo, por lo general se opta por proyectos con formas de cúpulas, por sus ventajas estructurales derivadas de su geometría, simplicidad de construcción y optimización de materiales.

Las bóvedas y cúpulas son estructuras utilizadas desde la antigüedad por sus múltiples ventajas. Estructuralmente hablando, las bóvedas y cúpulas son superficies curvas que transfieren principalmente cargas de compresión a sus apoyos. El problema principal en el diseño estructural de éstas, es la transferencia de los empujes a las fundaciones, por ello resulta fundamental diseñar el perfil de estas estructuras de tal manera que solo puedan darse fuerzas de compresión. La sección transversal ideal de una bóveda con alta carga muerta es una catenaria invertida

Para que la estructura sea estable la línea de presiones debe bajar por el medio tercio de la base de la fundación (Figura 11), lo que significa que la excentricidad debe ser menor o igual a $1/6$ del espesor. Con este diseño, la componente horizontal de la resultante es menor y se evitan los empujes laterales. Otra alternativa para absorber fuerzas de flexión, es la de diseñar contrafuertes o sistemas análogos que absorban dichos esfuerzos.

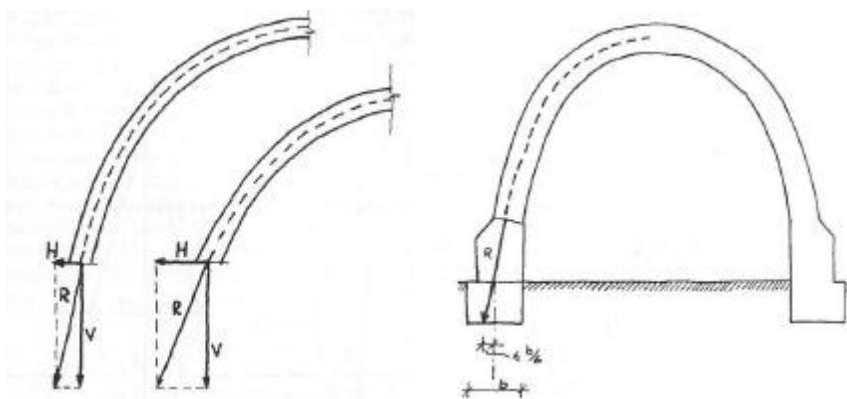


Figura 11: Fuerza resultante en el arranque de bóvedas y cúpulas (Izq.). Regla del medio tercio para el diseño y cálculo de bóvedas y cúpulas (Der.) Fuente: Minke (1994)

La ejecución y el levantamiento de las cúpulas vendrá marcada por los compases. Generalmente, la estructura consta de una parte recta en su comienzo, creando un cilindro cuya altura vendrá determinada por diseño, seguido de una curvatura hasta el cierre, creando una cúpula.

Dos son los tipos de compases a utilizar: compas central y compas de altura (Figura 12). El primero, definirá la curvatura horizontal del domo, es decir, la disminución del radio según se avance la construcción. El compas de altura, por su parte, se colocará en el exterior, en el hueco de la puerta y es el que nos marcará la curvatura vertical. Ambos compases se instalarán al

comienzo del replanteo y se mantendrán fijos durante toda la ejecución de la obra, para obtener una curvatura idónea.

Es muy importante comprobar la correcta posición de los sacos con los compases al finalizar cada hilada y antes de comenzar con la siguiente.

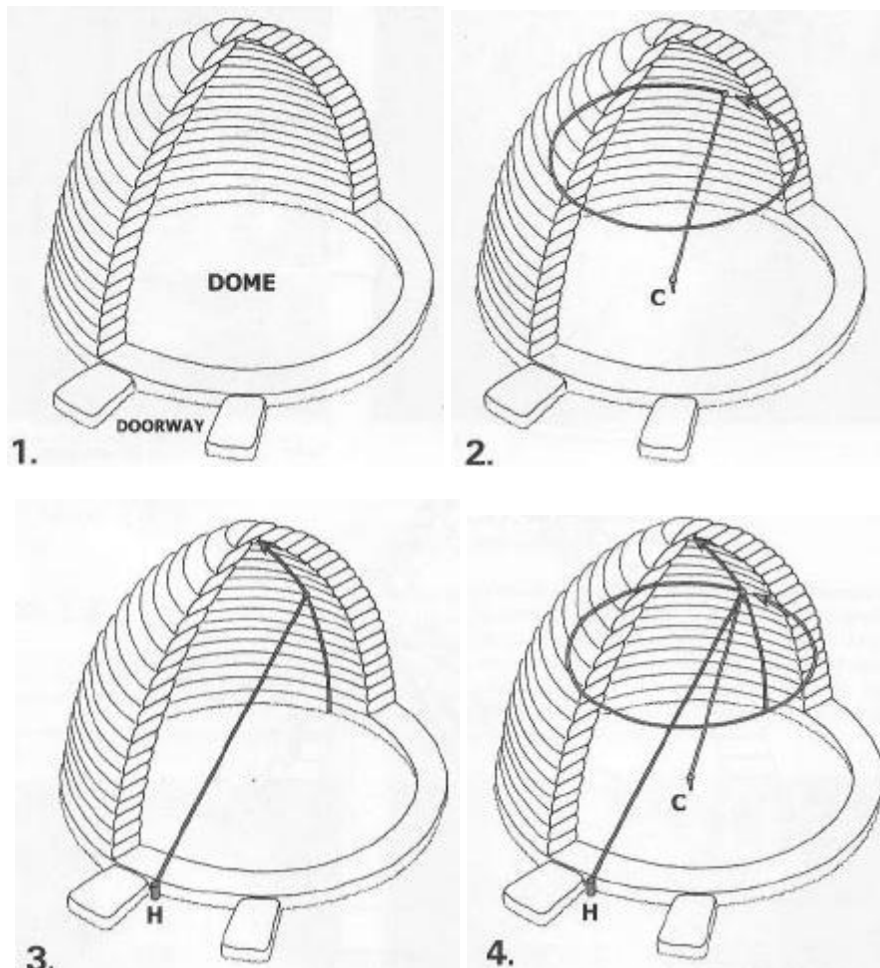


Figura 12: Compas central (C) y de altura (H) para el ejecución y replanteo de cúpula earthbag. *Fuente:* Khalili (2008).

Aunque las construcciones tipo domo aprovechan mejor el espacio y proporcionan un mejor confort interior por su forma, también es posible emplear la técnica earthbag para la construcción de viviendas más convencionales con paramentos rectos o una mezcla de muros rectos y curvos.

Para este tipo de construcciones, dependiendo de la longitud, altura y espesor de muros, será recomendable dotar a la estructura de elementos que proporcionen una mayor estabilidad, la cual puede ser conseguida de varios modos. Una opción será el diseño de contrafuertes o pilastras en el muro que refuercen la estructura. Otra opción, consiste en realizar la estructura a base de pilares y vigas de madera u otro material y utilizar los sacos de tierra como paramento cerrando el conjunto, proporcionando masa térmica a la vivienda pero no desempeñaran una función estructural.

En caso de realizar construcciones earthbag con muros rectos o mixtos, las cubiertas no podrán ser de tierra por el gran peso propio que posee el material. Se deberá optar entonces por

tipologías de cubiertas planas, inclinadas o vegetales, de materiales diversos como acero, bambú, hormigón o madera, siendo este último el más utilizado.

2.3.3. Fases de la construcción

Cimentación

La cimentación llevada a cabo en cada proyecto vendrá determinada por el tipo de suelo donde se pretende construir. Según su resistencia, estabilidad y drenaje se optará por una solución u otra.

Comúnmente, para las estructuras en cúpula que se construyen con este tipo de sistema, en condiciones normales de resistencia y composición del terreno, se opta por una cimentación con el mismo material que el resto de la estructura, mediante hiladas de saco continuo. El relleno de los sacos puede hacerse con mortero de tierra estabilizada, con mayor porcentaje de estabilizador para conseguir mayor resistencia, o con aditivos como la grava para aportarle mayor consistencia y resistencia a la expansión y contracción u otro tipo de estabilizadores según la necesidad del proyecto. Antes de la colocación del primer saco es importante, crear una barrera anti-capilaridad que evita el paso de humedad a la cimentación. Se dispondrá una cama de grava o escombros en el terreno sobre la que asentará la primera hilada de cimentación. Alternativamente, se puede optar por llenar la primera fila de sacos con grava o áridos gruesos.

Las hiladas de cimentación de estas estructuras deberán ser anillos completos unidos con alambre de púas y deberán estar correctamente protegidos de la humedad del terreno. Este tipo de cimentaciones podrán ejecutarse directamente sobre el terreno debidamente preparado y nivelado, o en zanjas perimetrales de cimentación donde alojar varias hiladas de sacos.

Las cimentaciones de hormigón armado convencional también son una opción para las construcciones Earthbag. Estos se diseñan como zapatas corridas, dimensionadas según las cargas que les transmita la estructura, las que podrán llegar al nivel del terreno o levantarse varios centímetros por encima de la cota cero actuando de zócalo. Para una unión sólida entre este tipo de cimentación y el resto de la estructura se deben dejar unas esperas de acero corrugado sobre las que se coloran las primeras hiladas. Será necesario también, crear algún sistema anti humedad para este tipo de cimentaciones, y colocar una barrera entre la zapata y las primeras hiladas de sacos que proteja la estructura de mayor manera.

Otra alternativa de cimentación la constituyen las elaboradas con neumáticos rellenos de grava o mortero. El neumático es de un material derivado del petróleo, con un alto grado de impermeabilidad y tiene un buen comportamiento frente a sismos o inundaciones. En el caso de occidente esta es una solución muy adecuada por el excedente de material existente. La cimentación suele ser enterrada aunque también se dan casos en los que la cimentación arranca directamente de la rasante del terreno.

Estructura

En el sistema constructivo Earthbag, los sacos cumplen una función totalmente portante, formando una estructura monolítica con la tierra como único material. El diseño y la geometría curva de las estructuras Earthbag favorece la distribución de cargas y otorgándole una estabilidad al sistema. Para conocer el espesor de los muros se debe efectuar un análisis de cargas que actúen sobre la estructura. Como se mencionó anteriormente, usualmente para la construcción de los muros se utilizan sacos tubulares de rafia de polipropileno con una anchura que varía de entre los 40-60 cm.

La metodología de trabajo a seguir durante todo el proceso de ejecución de los muros, se puede resumir en los siguientes pasos:

- Preparación del mortero de tierra estabilizada o no.
- Llenado de sacos y colocación.
- Compactado por hiladas.
- Replanteo y comprobación de la posición de las hiladas.
- Colocación del alambre de espino.



Figura 13: Proceso de ejecución de muros proyecto Earthbag Bon Mati, Girona. *Fuente:* Autor.

Puertas y Ventanas

Para la apertura de huecos en los muros de sacos de tierra, se crearán moldes y cimbras, que servirán de armazón durante el proceso de ejecución, ocupando los huecos donde posteriormente irán ubicadas las puertas y ventanas. Los moldes pueden hacerse de muchas maneras, con diferentes materiales y formas. Pueden ser de madera, metálicos, de PVC, incluso realizados con sacos y tierra sin estabilizar. Las formas, igualmente, son infinitas, se pueden colocar ventanas y puertas rectangulares de tamaños convencionales, o también ventanas redondas, triangulares, poligonales, etc., solo requiere del trabajo auxiliar de fabricación del molde adaptado a lo que se requiere. Se puede considerar el tamaño de las puertas y ventanas elegidas durante el proceso de diseño y personalizar los moldes de acuerdo a ellas, o viceversa.

Cubiertas

La formación y acabado de las cubiertas depende directamente de la solución estructural utilizada para los muros y la climatología del lugar donde se ubica la construcción. Hay muchos estilos y métodos de construcción de cubiertas que pueden ser adaptados en las construcciones Earthbag. Lo más común, es realizar las cubiertas con el mismo material que los muros, siguiendo el mismo sistema constructivo. La forma que adopta la cubierta es el de una cúpula que se crea a partir de reducir sucesivamente los radios de las circunferencias que conforman la estructura y aproximando las hiladas hasta cerrar el conjunto.

2.4. Investigaciones existentes

La construcción con sacos de tierra (Earthbag) es un método constructivo poco explorado académicamente, lo que sumado a la inexistencia de normativa establecida, hace más dificultoso poder establecer una práctica de diseño que este validada por la comunidad científica. Por ello, resulta importante hacer una revisión bibliográfica de las investigaciones previas, valorar los resultados obtenidos e indagar en aquellos puntos donde aún no exista claridad.

De acuerdo con las investigaciones existentes, la resistencia a la compresión ha sido la característica estructural mas estudiada de los earthbag.

Un primer estudio, fue el realizado por Dunbar (2006), consistente en varias pruebas de control y seguimiento para determinar la capacidad de las bolsas de polipropileno para soportar cargas verticales de compresión. El trabajo investigó la resistencia a compresión al apilar 3 sacos grandes con tres tipos diferentes de relleno descritos por el autor como arena, escombros y suciedad. El informe determinó la resistencia a la rotura, definida como la carga a la que se produce el primer desgarro de la bolsa. Los valores alcanzados para cada tipo de relleno fueron de 0,3MPa, 0,4 MPa y 2,1 MPa, respectivamente. Sin embargo, los testigos rellenos con “suciedad” no presentaron ningún desgarro, por lo que el valor de falla por rotura estuvo determinado por la capacidad del equipo. Las muestras llenas de arena siguieron ganando fuerza después del desgarro inicial, alcanzando un pico de 0.66 MPa, a diferencia de la muestras con escombros que perdieron toda fuerza significativa al alcanzar la falla del material de la bolsa. El modo de falla observado, consistió en el desgarro del material de la bolsa en dos líneas longitudinales paralelas en la cara superior e inferior de la bolsa media.

La composición del material de relleno no fue analizada, sin embargo se detectó que partículas angulares producen desgarros de las bolsas a cargas bajas. El estudio concluyo que la deflexión en lugar de la resistencia a compresión puede ser posiblemente el factor más crítico en la determinación de la idoneidad de las estructuras earthbag estructuras en la construcción.

Una segunda investigación en esta línea es la realizada por Daigle (2008). El trabajo estudió la resistencia a compresión vertical de pilas earthbag, considerando el efecto de diferentes tipos de relleno, alturas de pila y tamaños de bolsa. Los tamaños de bolsas estudiados fueron: 457mm x 762mm (pequeño) y 508mm x 914mm (mediano), mientras que los materiales de relleno analizados consistieron en granito triturado (12.7 mm de diámetro), suelo arenoso y suelo vegetal (“topsoil”).

Relativo al tamaño de la bolsa, se observo que los testigos de bolsa pequeña alcanzaron una resistencia ligeramente superior a la de los testigos medianos, considerándose casi despreciable. Las resistencias últimas registradas por las pruebas de Daigle para la configuración de pila de 3 sacos, fueron las más similares a las del estudio de Dunbar, alcanzando valores de 1,10 MPa a 2,98 MPa para las muestras rellenas de granito triturado, y de 2,33 MPa a 2,98 MPa para las muestras de suelo arenoso y de tierra vegetal. Sin embargo, esta comparación directa no sería del todo apropiada ya que el criterio de rotura es diferente para ambos autores. Para Daigle, la rotura se consideró como el momento en el que los sacos de polipropileno se rasgaban lo suficiente como para causar una pérdida de material de relleno, llevando a un descenso repentino de la resistencia, lo que explica los valores muchos mayores a los encontrados por Dunbar.

Otra limitante de los resultados en los ensayos de Daigle, fue que algunos testigos no alcanzaron la falla, no por comportamiento de las muestras sino más bien por la capacidad del equipo de prueba (valores de resistencia superiores de 2.98MPa).

Respecto a la altura de pila testeada de earthbag, se observó que pilas de 3 bolsas podrían exagerar las tensiones, producto del confinamiento del material de la bolsa causada por las placas de distribución de cargas por encima y por debajo de la muestra. Pilas de 6 y 9 sacos de

altura fueron testeados también. Respecto a este parámetro, el estudio concluyó que la resistencia a la compresión y la rigidez resulta inversamente proporcional a la altura de la pila.

Nuevos ensayos en esta materia fueron realizados por Pelly (2010) y Vadgama (2010). Para las pruebas se utilizaron sacos de polipropileno rellenas con arena fina clásica de construcción estabilizada con cemento y no estabilizada. Dichos autores investigaron la posible influencia de la cantidad de relleno en la resistencia a compresión, para lo cual ensayaron pilas de tres sacos de altura con distintas cantidades de material. Sin embargo, los resultados obtenidos no fueron satisfactorios producto de la poca altura de la pila. Otro factor estudiado fue la relación alto/ancho del saco, a fin de minimizar los efectos de retención finales que generarían una sobrestimación de las resistencias a compresión. Se determinó que a bajas proporciones de altura/ancho se generan confinamientos adicionales en los extremos, limitándose la expansión lateral de los sacos e induce esfuerzos cortantes. Una relación de altura/ancho ≥ 3.0 minimizaría dichos efectos.

En términos de resistencia, Pelly (2010) determinó que la resistencia a compresión para la configuración de pila de 8 sacos no estabilizados fue de 0.97MPa mientras que para la pila estabilizada fue de 1.37 MPa. Un resultado similar obtuvo Vadgama (2010), quien al adicionar un 4% de cemento aumento la capacidad de carga en un 22%, mejorando a su vez la rigidez de los earthbag.

El esfuerzo cortante fue analizado por Pelly (2010) y Vadgama (2010) mediante ensayos de corte directo (shearbox test). Pruebas con y sin alambre de espino fueron estudiadas (se colocaron dos hebras de alambre de espino entre las probetas apisonadas). Se encontró que el alambre de espinos no solo proporciona alguna adhesión a lo largo de la interfaz de las bolsas, sino que también produce un aumento en el coeficiente de rozamiento (0,66 comparado con 0,43 sin alambre de espinos, ver Figura 14).

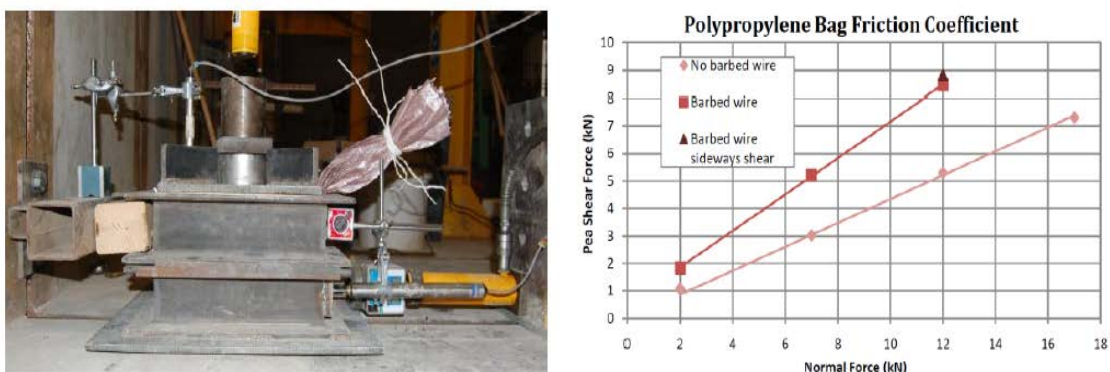


Figura 14: Ensayo de corte (Izq) y Resultados (der). Fuente: Pelly (2010).

Finalmente, ambos autores incluyeron en sus investigaciones, ensayos de resistencia a tracción de las bolsas de polipropileno. Pelly (2010), testeó tres muestras de 30 mm (que constaban de 12 fibras longitudinales), obteniendo una tensión de tracción promedio de 18,74 kN/m y una deformación de 14%. Vadgama (2010), por su parte, estudio diferentes tipos de materiales: arpillera y polipropileno de distintas densidades, en buen y en mal estado. Los resultados de este experimento se observan en la Figura 15. Se observa, que los sacos de polipropileno de 100 gsm poseen la máxima resistencia a la tracción y aproximadamente doblan en rigidez a las muestras de polipropileno de 70 gsm. La muestra de polipropileno 70gsm en mal estado no experimentó una gran reducción en resistencia a la tracción, sin embargo queda sujeto a rotura frágil. De este resultado se concluye que si una estructura earthbag, hecha con bolsas de polipropileno, se deja sin protección, estará sujeta a una ruptura abrupta si los esfuerzos de tracción en el polipropileno alcanzan la capacidad máxima de éste. Sin embargo, se requiere de una fuerza de compresión

alta como para causar una rotura de la bolsa de material, poco probable de alcanzar durante la vida útil del earthbag.

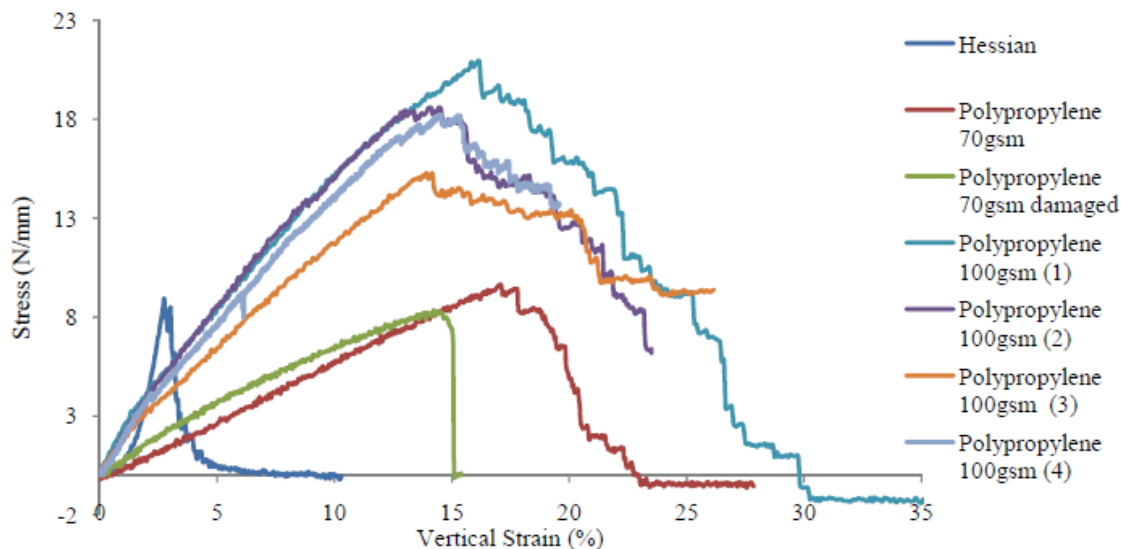


Figura 15: Gráfico Tensión v/s Deformación para las diferentes muestras, Ensayo de Tracción. Fuente: Vadgama (2010)

Otra investigación en la materia, es la realizada por Xu *et al.* (2008), que analiza el uso de earthbag¹ para aumentar la capacidad de carga en suelos blandos. Del estudio, se extraen resultados interesantes que pueden ser aplicados con provecho en las estructuras earthbag.

La investigación de Xu *et al.* (2008) comprendió ensayos de compresión no confinada en sacos individuales rellenos de arena de grano medio y grava, obteniendo resistencias de 1.6 MPa y 2.1 MPa, y deformaciones del 48% y 45% respectivamente. Se observó un modo de falla en los testigos consistente en desgarros longitudinales en los puntos de contacto con las placas y en las costuras de los sacos. Propiedades de tracción de bolsas de polipropileno fueron también estudiadas, obteniéndose una resistencia media de 23.7 kN/m y una deformación máxima a la tracción de 12,6 %. Finalmente, el estudio determinó que la resistencia a compresión de los earthbag es alta producto de las fuerzas de tracción en el material de la bolsa que genera un aumento de confinamiento en el suelo, concluyéndose que la resistencia a compresión de los earthbag está relacionada con la resistencia a la tracción del material de la bolsa y el ángulo de fricción interno del material de relleno.

¹ Los *earthbag* o bolsas rellenas de material, reciben el nombre *soilbag* en el ámbito de la geotecnia.

3. CAPITULO III . Teoría

3.1. Resistencia a compresión

La teoría de resistencia a compresión fue estudiada y evaluada por Pelly (2010) y Vadgama (2010), basados en la teoría existente, produjeron un análisis simplificado asumiendo condiciones de deformación plana.

Vadgama (2010) exploró el comportamiento de los earthbag considerando dos tipos de bordes para los sacos: rectangulares y semicirculares (ver Figura 16), y se basó en los siguientes supuestos:

- Los earthbags tienen una sección transversal constante y están completamente llenos con un material granular sin cohesión²; el volumen de las bolsas no cambia a lo largo de carga.
- Para el ensayo a compresión, las placas son rígidas y paralelas. La superficie de la platina no tiene fricción.
- El comportamiento del material de la bolsa es lineal elástico y se mantiene el espesor constante a lo largo de carga.
- Condición de deformación plana.
- Earthbag fallará en la cara superior e inferior, por lo tanto, el material de la bolsa llega a su capacidad máxima de tracción sólo en estos puntos.
- Para un estado sin carga, no hay tensión inducida en el material de la bolsa o en el relleno, el peso del material de relleno se desestima.
- La relación de estrés σ_v / σ_h se supone constante a lo largo de carga.

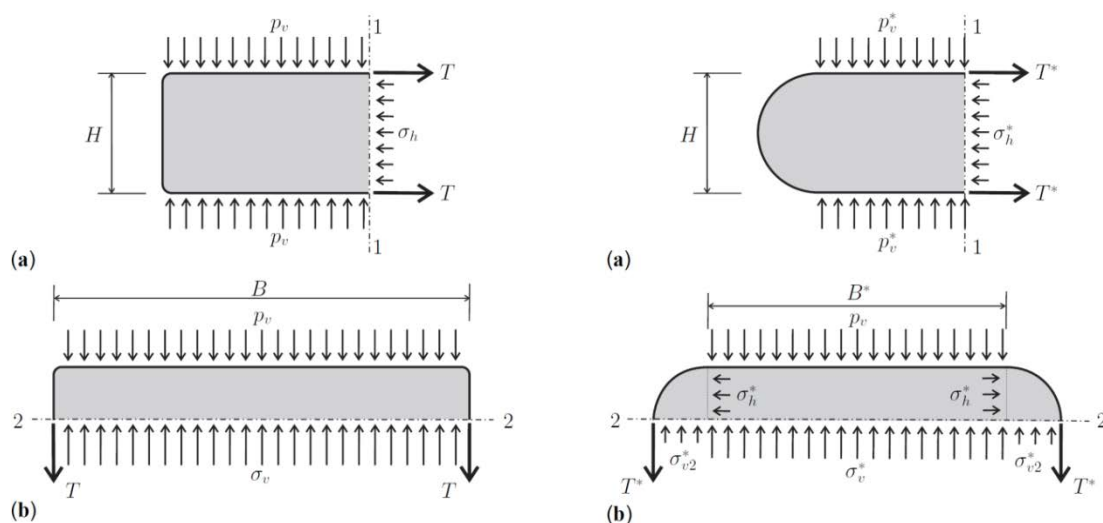


Figura 16: Diagramas de cuerpo libre de earthbag. Modelo rectangular (izq.) y modelo semi-circular (der.). Fuente: Vadgama (2010).

A partir de los dos modelos estudiado, Vadgama (2010) concluyó que la resistencia a compresión de un earthbag sometido a carga vertical depende de la resistencia a la tracción del material de la bolsa y del ángulo de fricción del material de relleno, para los supuestos descritos anteriormente. La rigidez general de un earthbag, por su parte, es más complicada de deducir y dependería de mas factores tales como el material de la bolsa, la compresibilidad del suelo y las restricciones superiores e inferiores del earthbag.

² En los ensayos de Pelly(2010) y Vadgama (2010) se utilizó arena como material de relleno, material que no posee cohesión, de ahí este supuesto.

El estudio determino que la carga de falla prevista del modelo semicircular era más precisa, sin embargo seguía siendo una sobre-estimación, por lo cual se considera aceptable la estimación del modelo rectangular. Asumiendo la relación de tensiones para el suelo (Ec. 3.3) y conociendo las propiedades del material de relleno (ver Figura 17), la carga de falla bajo compresión puede ser estimado haciendo equilibrio de fuerzas del diagrama de cuerpo libre para el modelo rectangular (suponiendo que la bolsa falla en las caras superior e inferior).

$$\sigma_h = \frac{2T}{BL} \quad (3.1)$$

$$\sigma_v = p_v \quad (3.2)$$

$$K = \frac{\sigma_v}{\sigma_h} \quad (3.3)$$

Donde σ_h y σ_v son las tensiones horizontales y verticales experimentadas por el material de relleno y P_v es el esfuerzo vertical externo aplicado.

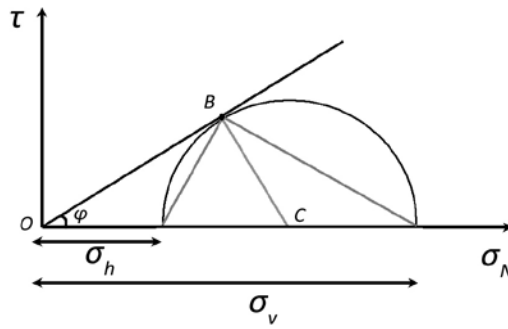


Figura 17: Envolvente de falla Mohr-Coulomb para earthbag, donde $\sigma_v > \sigma_h$.

$$\frac{\sigma_v - \sigma_h}{\sigma_v + \sigma_h} = \sin \varphi \quad (3.4)$$

$$\sigma_v = \sigma_h \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} = \sigma_h K_p \quad (3.5)$$

Combinando la ecuación (3.1) y (3.5) se tiene:

$$p_v = k_p \left(\frac{2T}{BL} \right) \quad (3.6)$$

$$\therefore \text{En la falla} \quad p_v = \frac{2\sigma_{bag}^{limit}}{H} K_p \quad (3.7)$$

Una simplificación de este análisis, fue propuesta por Pelly (2010) para el modelo rectangular. El autor consideró una pila earthbag de altura infinita sometida a una carga vertical F (Figura 18), que deja de lado las placas de carga, ignorando así el peso propio de las bolsas (que en una pila real es insignificante en comparación con la fuerza aplicada). De este modo, la carga F aplicada, movilizara plenamente el suelo dentro de las bolsas, generara una tensión vertical de σ_y y una tensión horizontal de $k_a \sigma_y$. La predicción sencilla propuesta por Pelly (2010) para F , viene dada por:

$$F = \frac{2T}{K_a H} \cdot LB \quad (3.8)$$

$$\text{con} \quad K_a = \frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi}$$

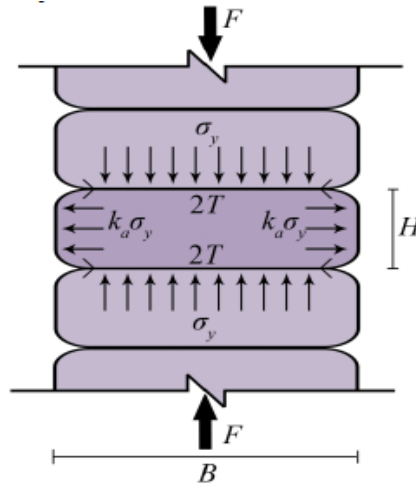


Figura 18: Diagrama de cuerpo libre, análisis pila de altura infinita para Earthbag. Fuente: Pelly (2010).

La estabilización del suelo, también fue analizado por Vadgama (2010). La Figura 19 representa el desplazamiento vertical de la línea de falla en el diagrama de Mohr, producido por la cohesión inicial que proporciona el cemento. Se observa que al estabilizar el material de relleno, se necesitaría una presión vertical mayor para provocar el fallo de la earthbag. Un afecto similar se obtendría con la introducción de arcilla, al actuar como un aglutinante y proporcionar una cierta cohesión al suelo. Las ecuaciones siguientes, muestran la correspondiente relación entre la presión vertical y horizontal obtenida, suponiendo una sección rectangular para el earthbag.

$$\sigma_v = 2c'\sqrt{K_p} + \sigma_h K_p \quad (3.10)$$

$$\text{con } K_p = \frac{1+\sin \varphi}{1-\sin \varphi}$$

$$\therefore \sigma_v = 2c'\sqrt{K_p} + \frac{2\sigma_{bag}^{limit} t}{H} K_p \quad (3.11)$$

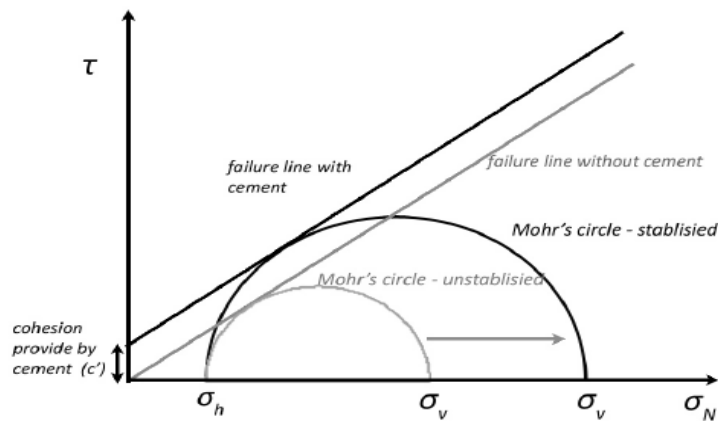


Figura 19: Envolvente de falla Mohr-Coulomb que muestra el efecto de la estabilización con cemento, $\sigma_v > \sigma_h$.
Fuente: Vadgama (2010).

3.2. Resistencia al corte

Para predecir un posible modo de fallo de una estructura earthbag es necesario estudiar y comprender como se comportan bajo corte directo.

De acuerdo con Vadgama (2010), el esfuerzo cortante entre dos earthbag puede ser descrito usando el modelo de fricción de Coulomb, tal como se define en la ecuación (3.12):

$$F_f = \mu \cdot F_N \quad (3.12)$$

con $\mu = \tan \varphi = \text{coef. fricción}$

La teoría de fricción de Coulomb establece que la cohesión y el coeficiente de fricción a lo largo de una interfaz gobiernan la resistencia de fricción, independientemente del área sobre la que cual se aplica la carga normal. Para bajas carga normales aplicadas, la interacción entre los dos cuerpos se vuelve difícil de predecir.

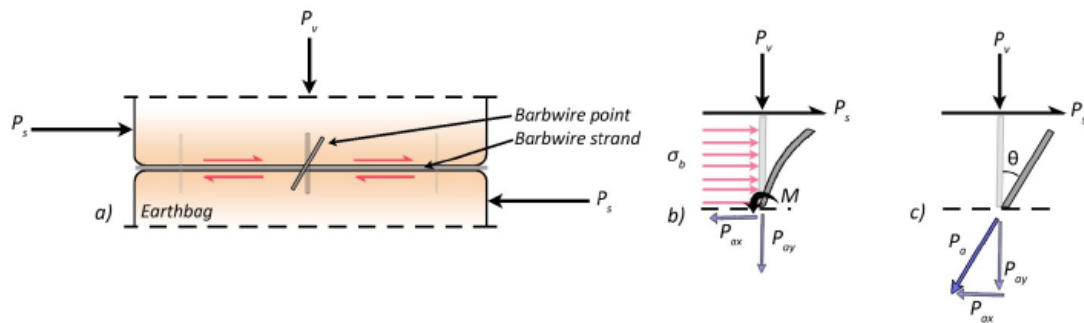


Figura 20: Modo de fallo teórico del alambre de espino bajo corte directo. a) Vista general b) Falla por flexion c) Falla cortante cuerpo rígido. *Fuente:* Vadgama (2010).

Además de la fricción entre las bolsas, Vadgama (2010) incluyó el efecto del alambre del espino entre los sacos para describir la resistencia al corte de earthbags. Se consideró que la punta del espino es lo suficientemente rígida en comparación con la capacidad de momento, previéndose una falla rígida del alambre (ver Figura 20). Así, la hebra del alambre de espinos giraría y resistiría el movimiento lateral entre los sacos. La falla se produciría entonces cuando el material de la bolsa empiece a romperse, hecho que ocurriría antes de la fatiga de la hebra del espino. Esta suposición permite a Vadgama (2010) concluir que el alambre de espinos mejoraría la resistencia al corte entre los earthbag.

4. CAPITULO IV. Procedimiento experimental

El presente capítulo se hace una descripción detallada de los ensayos de laboratorio realizados como parte de esta investigación. El objetivo general de este estudio es la comprensión del comportamiento estructural de las construcciones Earthbag, para lo cual este programa experimental contempla la realización de dos tipos de ensayos: compresión no confinada y cortante³. Adicionalmente, se realizó un ensayo de sedimentación a una muestra de finos del material de relleno utilizado, a fin de estudiar el porcentaje de arcillas presente en la tierra utilizada.

4.1. Programa de Ensayo

4.1.1. Material utilizado

- Material de Relleno

La tierra utilizada en este estudio, proviene de una finca rústica situada al costado de Can Rigolós, cercana a la zona industrial de Sant Llorenç, a las afueras de la población de Santa Coloma de Farnes, capital de la comarca de la Selva integrada a la provincia de Girona. Este material, ha sido facilitado y caracterizado previamente en la investigación realizada por Francesc Massó en *Millora de la Tàpia mitjançant l'ús d'encenalls de suro natural; un àrid amb propietats tèrmiques*, TFG para optar al grado de Arquitectura Técnica de la Universidad de Girona.

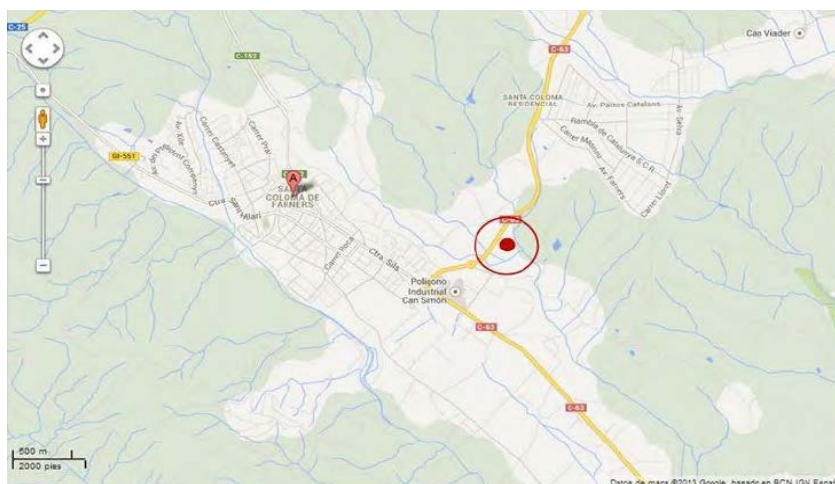


Figura 21: Ubicación de la finca de extracción de la muestra, Santa Coloma del Farnes, Girona. Fuente: Massó (2013).

De acuerdo con Massó (2013), para la obtención de la muestra se realizó un pozo 1,5 x 1,5 m de superficie aproximada. La capa inicial (0,30 m) que contiene materia orgánica es retirada y posteriormente se extraen 200 kg de material que constituyen la muestra propiamente a servir.

³ Es importante señalar que las intenciones primeras de este TFM eran las de hacer mediciones in-situ durante el proceso constructivo de un cúpula de Earthbag, proyecto del arquitecto y co-tutor de este trabajo Gabriel Barbeta Sola, en la localidad de Bon Matí, Girona. Dicho proyecto tuvo sus inicios de obra en abril del 2012, sin embargo y por motivos personales de la propietaria, el proyecto fue suspendido, no pudiendo llevarse a cabo las mediciones en terreno. De este modo y tras la imposibilidad de contar con una construcción real de Earthbag, se optó alternativamente por la realización de ensayos de laboratorio.

La muestra posee un color similar a las illitas o caolinitas, sin presencia de sulfuros de hierro ni materia orgánica y con presencia de óxidos en baja proporción (ver Figura 22).

Cabe señalar, que la muestra de suelo de Santa Coloma del Farnes está constituida mayoritariamente por terrones de diversas dimensiones que una vez secados resultan muy difícil de desgranar, por este motivo fue necesaria la utilización de medios manuales mecánicos (martillo de goma, pisón, etc.) para conseguir una muestra suelta.

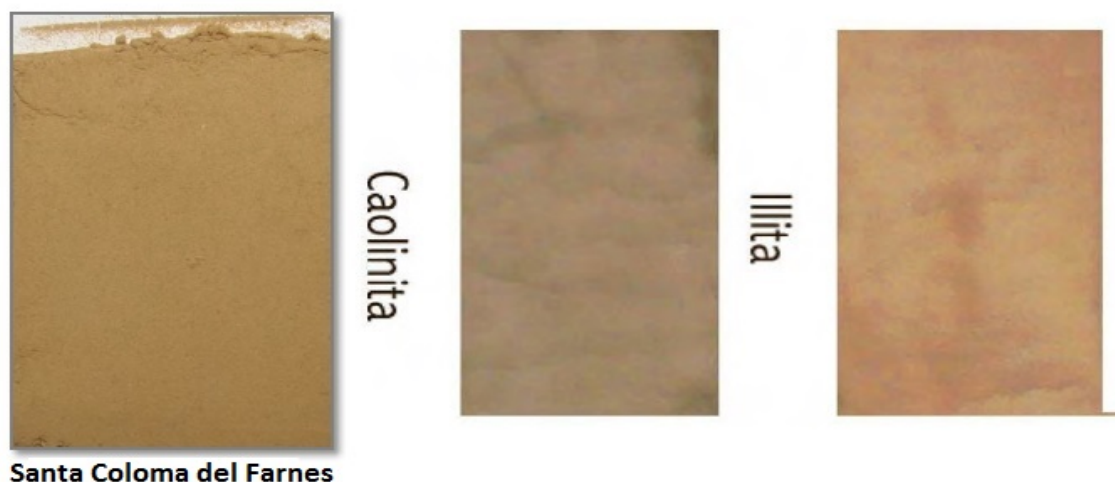


Figura 22: Tabla comparativa de colores: muestra de tierra Santa Coloma del Farnes y arcillas caolinita e illita. *Fuente:* Massó (2013)

A continuación, se presentan los resultados y conclusiones que F. Massó obtuvo de sus ensayos y que servirán de base para la presente investigación.

La presencia de materia orgánica fue determinada mediante el Método de oxidación por vía fría⁴. El porcentaje obtenido fue de 0,731, resultado bastante bajo, por lo que es un factor que no debe preocupar.

En la siguiente tabla, se muestran los resultados de la caracterización de los límites del suelo⁵:

	Fracción < 80 μm	Fracción < 320 μm
Límite líquido (LL) [%]	36	29
Límite plástico (PL) [%]	18,32	16,3
Índice de plasticidad (IP)	17,68	12,7

Tabla 1: Propiedades físicas de la muestra de suelo de Santa Coloma de Farnes. *Fuente:* Massó (2013).

El índice de plasticidad obtenido de 17,68%, se encuentra dentro del rango plasticidad media. Según la investigación de Massó (2013), este tipo de plasticidad puede relacionarse con la presencia de arcillas caolinitas⁶.

⁴ Para este ensayo, Massó (2013) siguió el procedimiento descrito en el Dossier de prácticas de edafología de Ingeniería Técnica Agrícola en Explotaciones Agropecuarias, 1998-1999. *Vease:* Gispert, et al. (1998-1999) Apartado Materia Orgánica (Método de oxidación por vía fría).

⁵ UNE 103 103: 94. Determinación del límite líquido de un suelo por el método del aparato de Casagrande [Norma Española]= UNE 103-103-94// Normas UNE.-Madrid: AENOR, Febrero/1994.-p10.-CDU 69.051:624.137.37.

UNE 103 104:93. Determinación del límite plástico de un suelo [Norma Española]=UNE- Madrid: AENOR, Febrero/1993.-p2.-CDU 624.131.37.

Para la determinación de la curva granulométrica, que clasifica el suelo en función del tamaño de grano predominante en su composición, Massó (2013) llevo a cabo una serie de ensayos: Granulometría por tamizado, Densidad aparente para partículas < 80 μm (Ensayo del Picnómetro) y Sedimentación (Sedimentometría).

La densidad aparente de las partículas < 80 μm de suelo obtenida con Ensayo del Picnómetro fue de: 2,49 g/cm³.

Debido a los resultados obtenidos por la floculación⁷ de las arcillas, el ensayo de granulométrico por tamizado tuvo que ser repetido e introducir una variante: Granulometría por lavado, tamizado y secado (UNE 103 101:1995). En la Tabla 2 y siguiente gráfica se presentan los resultados obtenidos de este ensayo.

Diametro particulas	Masa suelo retenido	Porcentaje retenido	Porcentaje pasante
[mm]	[g]	[%]	[%]
10	0	0,00	100,00
5	0,7	0,35	99,65
2,5	3,7	1,85	97,80
1,25	10,8	5,40	92,40
0,63	17	8,50	83,89
0,32	23,9	11,96	71,94
0,16	18,9	9,45	62,48
0,08	18,8	9,40	53,08
resto	106,1	53,08	0,00

Tabla 2: Granulometría por lavado, tamizado y secado, partículas $\geq 80 \mu\text{m}$. (UNE 103 101:1995). Fuente: Massó F. (2013).

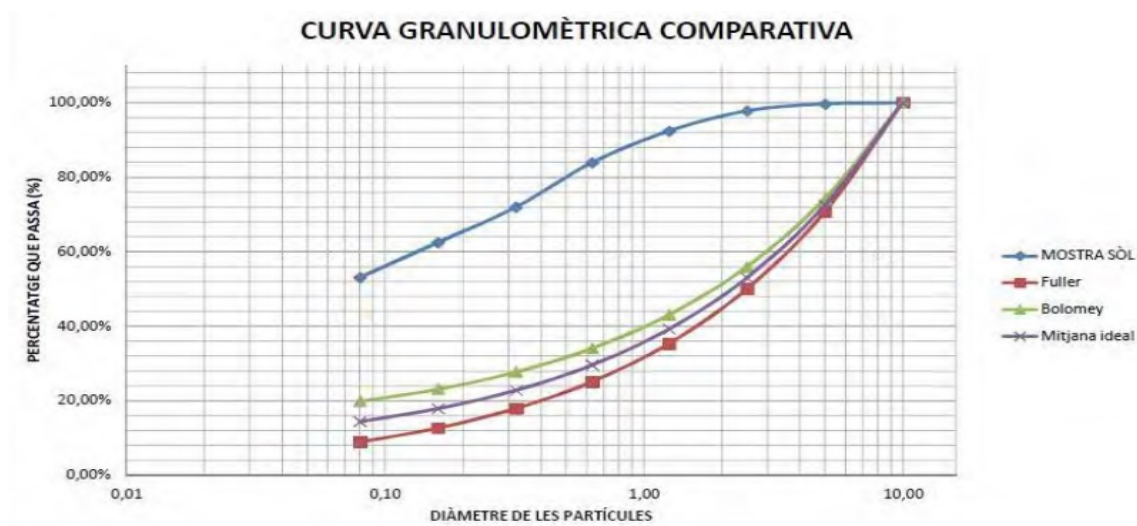


Figura 23: Curva Granulométrica por lavado, tamizado y secado, partículas $\geq 80 \mu\text{m}$ (UNE 103 101:1995). Fuente: Massó (2013).

⁶ Hipótesis derivada de la investigación de Barbeta (2002).

⁷ Floculación: f. *Quim.* Agregación de partículas solidas es una dispersión coloidal, en general por la adición de algún agente. Fuente: RAE.

De la Figura 23, que compara la curva granulométrica con las curvas ideales de Fuller, Bolomey y la Mediana ideal resultante, se observa que se está en presencia de un suelo con una clara descompensación de las cantidades de cada uno de sus componente.

A continuación se presentan resultados obtenidos por Massó (2013) del ensayo de sedimentación que permite evaluar la distribución de las fracciones granulométricas $< 80 \mu\text{m}$.⁸

Diàmetre de les partícules (mm)	Temps (minuts)	Percentatge retengut (% sobre el total de fins)	Pes dels fins retenguts (distribució del total dels fins de la mostra de 200g) (g)	Percentatge passants (% respecte el total de fins)
0,07868	0,3	9,06%	9,61	91,00%
0,04508	1	10,00%	10,61	81,00%
0,03426	2	18,00%	19,10	63,00%
0,02940	3	14,00%	14,85	49,00%
0,02614	4	8,00%	8,49	41,00%
0,01860	8	2,00%	2,12	39,00%
0,01388	16	18,00%	19,10	21,00%
0,01048	30	12,00%	12,73	9,00%
0,00745	60	2,00%	2,12	7,00%
0,00529	120	3,00%	3,18	4,00%
0,00189	960	3,00%	3,18	1,00%
0,00154	1440	0,00%	0,00	0,00%
0,00109	2880	0,00%	0,00	0,00%

Tabla 3: Ensayo sedimentación partículas $< 80 \mu\text{m}$. (Sedimentometría). Fuente: Massó (2013).

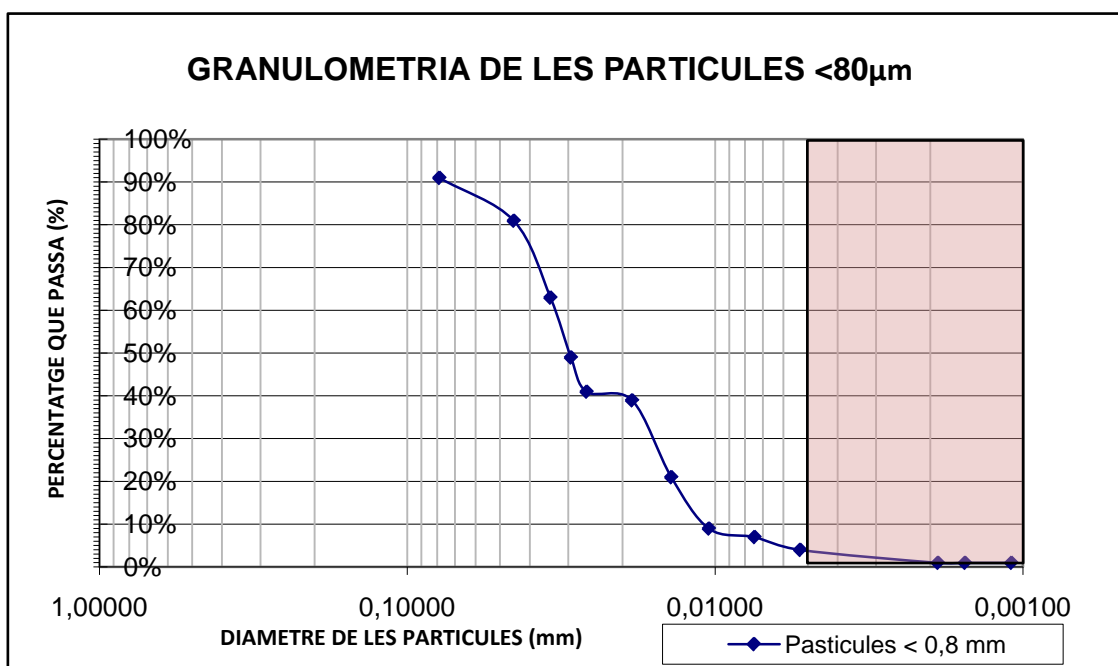


Figura 24: Curva Granulométrica de las partículas $< 80 \mu\text{m}$. (Ensayo de sedimentación). Fuente: Massó F. (2013).

Considerando la clasificación que proporciona Minke (1994), las partículas menores a 0,002 mm se denominan arcilla, entre 0,002 mm y 0,06 mm limo y entre 0,06 y 2 se consideran arenas

⁸ Para la realización del ensayo, el autor se basó en el procedimiento descrito en Barbeta (2002), y se consultaron las normas UNE 103 102(1995) y la ASTM D422-63(2007).

Así, las partículas finas de la muestra de suelo estudiada estarían distribuidas en 8% de arenas finas, 87 % de limos y 5 % arcillas. Si bien, el ensayo arroja una presencia de arcilla este porcentaje es bastante bajo y no parece ser coherente con la cohesividad que se observa al secar la muestra, como se comento anteriormente. Por este motivo y a fin de llegar a la caracterización real del suelo en estudio, Massó (2013) propone repetir el ensayo procurando utilizar algún agente químico que favorezca la desfloculación, y corroborar así la validez o no de estos datos. En esta investigación, se considera apropiado la recomendación y se repite el ensayo utilizando un antifloculante. Los resultados de la nueva sedimentometría se presentan en la siguiente sección de este capítulo (4.1.2.).

DIAMETRE TAMIS (mm)	MASSA DE SÒL RETINGUT (g)	PERCENTATGE RETINGUT	PERCENTATGE QUE PASSA
10	0,00	0,00%	100,00%
5	0,70	0,35%	99,65%
2,5	3,70	1,86%	97,79%
1,25	10,80	5,43%	92,36%
0,63	17,00	8,55%	83,81%
0,32	23,90	12,02%	71,79%
0,16	18,90	9,50%	62,29%
0,08	18,80	9,45%	52,84%
0,079	9,61	4,83%	48,01%
0,045	10,61	5,33%	42,67%
0,034	19,10	9,60%	33,07%
0,029	14,85	7,47%	25,60%
0,026	8,49	4,27%	21,33%
0,019	2,12	1,07%	20,27%
0,014	19,10	9,60%	10,67%
0,010	12,73	6,40%	4,26%
0,007	2,12	1,07%	3,20%
0,005	3,18	1,60%	1,60%
0,002	3,18	1,60%	0,00%

MASSA TOTAL 198,90

MASSA TOTAL SORRES + LLIMS + ARGILES	194,50	100,00%
Sorres	99,01	50,91%
Llms	89,12	45,82%
Argiles	6,36	3,27%

Tabla 4: Distribución granulométrica total. Combinación del ensayo granulométrico por lavado, secado y tamizado y la Sedimentometría. *Fuente:* Massó (2013).

En la tabla resumen anterior, se pueden identificar las fracciones que componen el suelo: en color se tienen las fracciones fina y sin color, fracción más gruesa (gravilla). De acuerdo con estos resultados, Massó (2013) concluye que la tierra de Santa Coloma del Farnés analizada se encuentra en el límite de un suelo *limo-arenoso* y un *suelo arenoso*.⁹

- Estabilizante

El porcentaje tan bajo de arcillas (5%), componente que le otorga la capacidad aglutinante al suelo, plantea posibles problemas a la hora de garantizar unas características de resistencia, de estabilidad volumétrica y durabilidad aceptable. Sin embargo, para sistemas de earthbags la gama óptima aceptada actualmente para el contenido de arcilla está entre el 5% y el 30% (Hunter y Kiffmeyer, 2004), por lo que se estaría dentro de los estándares permitidos y no sería necesaria una estabilización química de la muestra (cal, cemento, etc).

De todas formas, y a fin de investigar la posible influencia que el material de relleno puede tener en el comportamiento estructural del sistema earthbag, se considera prudente estabilizar químicamente con cemento portland algunas muestras y evaluar si existen o no mejoras de resistencia.

La elección del cemento portland como estabilizante, radica en que la Caolinita (tipo de arcilla que probablemente contiene la tierra estudiada) es compatible con este estabilizante. A su vez,

⁹ Clasificación que se obtiene de aplicar los porcentajes de arcilla, limo y arena en el diagrama trilineal de distribución granulométrica (Véase: CRAterre)

otros estabilizantes, como por ejemplo la cal, requieren de un curado más prolongado, lo que para efectos de esta investigación retrasaría los resultados.

Finalmente, se estabilizara con un 10% de cemento portland¹⁰.

- Sacos

Los sacos cumplen la función de encofrar y aportar mayor resistencia al conjunto. Ellos contienen y dan forma a la mezcla durante el proceso de llenado, compactación y secado hasta el endurecimiento. Usualmente, se utilizan sacos tubulares de rafia de polipropileno con una anchura que varía de entre los 40-60 cm. Para nuestro caso de estudio y por motivos prácticos de ensayo, se ha seleccionado la dimensión más pequeña de sacos existente en el mercado que corresponde a 250 x 520 mm (¹¹).

4.1.2. Ensayo de sedimentación

Este ensayo tiene por objetivo la determinación cuantitativa de la distribución de las partículas de suelo de tamaño menor a 75 micrómetros (material pasante del tamiz No.200 ASTM), mediante el proceso de sedimentación utilizando un hidrómetro.

El método de sedimentación está basado en la Ley de Stokes, según la cual la velocidad de caída de una esfera sumergida en un fluido es igual a:

$$v = \frac{D^2(\gamma_s - \gamma_w)}{18\eta} \quad (4.1)$$

donde:

v: velocidad de caída de la esfera

γ_s : peso específico del material de la esfera.

γ_w : peso específico del agua.

D: diámetro de la esfera.

η : coef. de viscosidad o viscosidad dinámica absoluta del fluido.

El diámetro D de la partícula que tarda el tiempo t en caer desde la superficie a la profundidad L se puede hallar mediante la ley de Stokes (4.2) escrita del siguiente modo:

$$D = \sqrt{\frac{18\eta}{\gamma_s - \gamma_w} \cdot \frac{L}{t}} = K \sqrt{\frac{L}{t}} \quad (4.2)$$

donde K y L se obtienen de las tablas adjuntas en el Anexo I.

¹⁰ El cemento utilizado corresponde al Cemento Lafarge, CEM II/B-L.

¹¹ Empresa Multisac.es

Procedimiento

Para la realización del ensayo, se tomo como guía el procedimiento descrito en Barbeta G. (2002)¹², y en Massó (2013), y se consultaron las normas UNE 103 102(1995) y la ASTM D422-63(2007).

La sedimentometría se efectuó sobre 50 gr. de muestra seca y tamizada en malla No 200 (material proveniente del Ensayo de Granulometría por rentado, tamizado y secado).

El primer paso del ensayo consiste en mezclar en una probeta 50 g. de material con 125 ml defloculante (calgon o silicato de sodio) y agua destilada, a una concentración de 40 g. de dispersante por litro de solución. La mezcla se deja reposar 24 hrs.

Una vez transcurrido este tiempo, se pasa toda la mezcla al vaso de agitación, añadiendo agua destilada hasta unos 5 cm del borde del vaso de agitación. Se coloca este en el aparato agitador mecánico y se agita durante 1 min a no menos de 10000 r.p.m.

Inmediatamente, se coloca la dispersión preparada a una probeta de vidrio graduada y se añade agua destilada hasta completar 1000 ml. A continuación, se tapa el extremo abierto con un tapón de corcho y papel film (para no perder material) y se agita vigorosamente en posición horizontal a razón de 3 ciclos/segundo durante un minuto. Pasado este tiempo, se coloca la probeta verticalmente al costado de una probeta secundaria de iguales características y capacidad que contiene sólo agua destilada para depositar el densímetro entre lectura y lectura, a fin de evitar lecturas erróneas.

Antes de iniciar las lecturas de densidad, se debe tomar la temperatura ambiente, las temperaturas de las aguas de las probetas y anotado las correcciones del densímetro y el menisco. Dispuesto todo, se inician las mediciones. Las lecturas se efectúan introduciendo el densímetro en suspensión dentro de la probeta con la mezcla y se anotan las lecturas de las densidades, para los tiempos: 30", 1', 2',3',4',8',16',30',1 h, 2h,16h,24h y 48h. Para las dos lecturas iniciales, no se debe quitar el densímetro de la probeta, posteriormente es recomendable introducir el densímetro suavemente cada vez que se desee hacer una nueva lectura, unos 20 s antes de realizar la toma. Tras realizar la lectura, se debe quitar el densímetro y dejar reposar en la probeta secundaria.

Finalmente, los datos obtenidos se introducen en hoja de cálculo (Excel), facilitada y elaborada especialmente para este ensayo por el Dr. Barbeta, que calcula el tamaño y cantidad de fracción granulométrica sedimentada a cada instante, aplicando la formula de Stokes (véase Anexo).



Figura 25: Sedimentometría; preparación de la muestra 50 g < 80 μm .. Fuente: Autor.

¹² En Barbeta (2002). Apartado *Método de Análisis* - Muestra Método - Tom I



Figura 26: Sedimentometría; materiales de ensayo (Izq.) y Agitación manual de la probeta (Der.). *Fuente:* Autor.



Figura 27: Sedimentometría: toma de lecturas con el densímetro. *Fuente:* Autor.

Diametro partículas	Tiempo	Porcentaje retenido	Peso finos retenidos	Porcentaje pasante
[mm]	[min]	[% sobre el total de finos]	[distribución del total de finos de la muestra de 200 g]	[% respecto del total de finos]
0,079	0,3	16,96%	17,99	83%
0,046	1	14,00%	14,85	69%
0,034	2	10,00%	10,61	59%
0,028	3	6,00%	6,37	53%
0,025	4	4,00%	4,24	49%
0,018	8	4,00%	4,24	45%
0,013	16	4,00%	4,24	41%
0,009	30	2,00%	2,12	39%
0,007	60	2,00%	2,12	37%
0,005	120	2,00%	2,12	35%
0,002	960	4,00%	4,24	31%
0,001	1440	2,00%	2,12	29%
0,001	2880	2,00%	2,12	27%

Tabla 5: Ensayo sedimentación partículas < 80 μm . (Sedimentometría). *Fuente:* Autor.

De la Tabla 5 y Figura 27, y considerando la clasificación de Minke (1994) para la distribución de las partículas finas de la muestra estudiada se tiene que: 24% arenas, 45% limos y 31% arcilla. Los resultados obtenidos, son más coherentes a los obtenidos por Massó (2013) y se consideran que reflejan mas la realidad del suelo. Al parecer, la recomendación del repetir el ensayo utilizando un defloculante era acertada, ya que como se había comentado, al secar una muestra de suelo en la estufa, se obtenían terrones bien cohesionados que hacían presumir de la presencia de partículas arcillosas.

Adicionalmente, en Massó *et al* (2014) se efectuó un ensayo de difracción de rayos X a la muestra de tierra de Santa Coloma, concluyéndose y corroborado la hipótesis que la arcilla predominante es la Caolinita (véase Figura 45, Anexo)

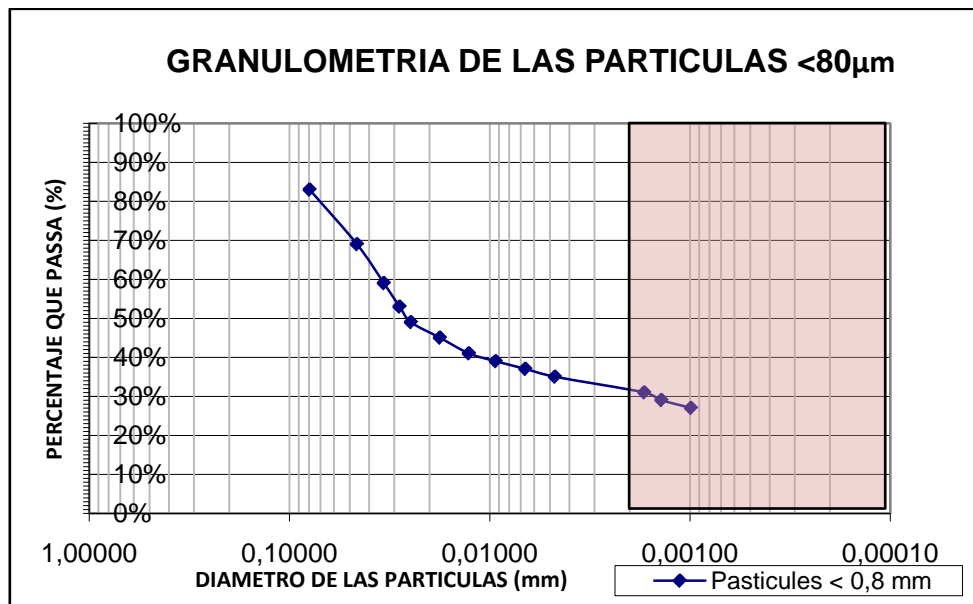


Figura 28: Curva Granulométrica de las partículas < 80 µm. (Ensayo de sedimentación). *Fuente:* Autor.

Diametro partículas	Masa suelo retenido	Porcentaje retenido	Porcentaje pasante
[mm]	[g]	[%]	[%]
10	0	0,00	100,00
5	0,7	0,35	99,65
2,5	3,7	1,85	97,80
1,25	10,8	5,41	92,39
0,63	17	8,51	83,88
0,32	23,9	11,96	71,92
0,16	18,9	9,46	62,46
0,08	18,8	9,41	53,05
0,079	17,99	9,01	44,05
0,046	14,85	7,43	36,61
0,034	10,61	5,31	31,30
0,028	6,37	3,19	28,12
0,025	4,24	2,12	25,99
0,018	4,24	2,12	23,87
0,013	4,24	2,12	21,74
0,009	2,12	1,06	20,68
0,007	2,12	1,06	19,62
0,005	2,12	1,06	18,56
0,002	4,24	2,12	16,43
0,001	2,12	1,06	15,37
0,001	2,122	1,06	14,31

Masa Total: Arena + limo+ arcilla	195,4	100
Arenas	107,39	54,96
Limos	48,81	24,98
Arcillas	39,20	20,06

Tabla 6: Distribución granulométrica total. Combinación del ensayo granulométrico por lavado, secado y tamizado y la Sedimentometría. *Fuente:* Autor.

4.1.3. Preparación de la muestra

Para el llenado de los testigos, se utilizó la tierra de Santa Coloma del Farnés. El primer paso, consistió en triturar cuidadosamente el material utilizando un mortero de piedra, debido a la existencia de terrones de un tamaño considerable. Una vez homogenizada la mezcla (tamaño de partícula) se puso en la mezcladora y se fue agregando agua hasta alcanzar un contenido de humedad adecuado (Ensayo de la bola). Para el caso de las probetas estabilizadas con un 10%

de cemento, primero se mezclaron los materiales en seco (tierra + cemento) y luego se fue agregando agua (ver Figura 30).

Los sacos se llenaron con una cantidad de material de 6 kg (húmedo), peso identificado como ideal para el manejo individual de cada testigo y que se ajusta a las restricciones físicas de los equipos utilizados (prensa). Tras el llenado, el extremo abierto de la bolsa se tuerce y dobla por debajo, tal y como se procede en terreno en las construcciones earthbag (ver Figura 31). Posteriormente, cada testigo earthbag se apisono hasta conseguir que la superficie superior quedase plana y nivelada, que no se apreciaran deformaciones visibles al apisonar mas, y que el ruido del impacto cambiase de un golpe seco a un 'ring'¹³ (esto en la práctica equivale aproximadamente 20-30 golpes).

Las pequeñas curvaturas en los bordes de la bolsa fueron ignoradas, y se midieron y anotaron las dimensiones de cada probeta tras el apisonado. La longitud de cada probeta fue tomada como la longitud media entre los bordes y el centro de la bolsa, producto de la variación natural e irregularidad de las formas earthbag (ver Figura 29).

Los sacos estabilizados se dejaron endurecer durante 14 días en estufa y luego se apilaron para las prueba (por motivos de tiempo y disponibilidad del laboratorio, no fue posible esperar los 28 días de secado). Por su parte, las probetas no estabilizadas, también se dejaron secar unos 3-4 días a temperatura ambiente (del laboratorio) y luego se pusieron en a estufa.

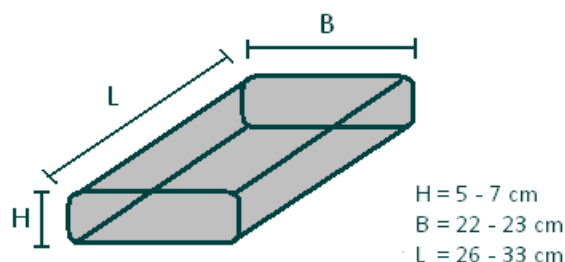


Figura 29: Esquema representativo testigo earthbag de ensayo. *Fuente:* Autor.

¹³ El apisonamiento se efectuó manualmente con un mortero de piedra.



Figura 30: Preparación del material de relleno para testigos earthbag. *Fuente:* Autor.



Figura 31: Preparación de los testigos de earthbag: forma de cierre y apisonado. *Fuente:* Autor.

4.2. Ensayo de resistencia a compresión

Ocho ensayos de compresión no confinada se llevaron a cabo en el laboratorio de materiales de la Universidad de Girona (UDG): cuatro para el material estabilizado y cuatro para el relleno sin estabilizar. Se utilizó la Prensa Universal de Ensayos, Mod. MUE-60 (Serie ME-403), con capacidad de carga de 3000 kN.

Para los ensayos, se construyeron dos placas de distribución de carga de acero, de 7 mm de espesor (superior e inferior), que se adaptaron a la prensa a fin de asegurar una carga uniforme en las muestras de ensayo. Las pruebas se llevaron a cabo para alturas de apilamiento de 2 sacos y se sometieron a una carga uniforme, a frecuencia de carga de 5 mm/min.

A fin de reproducir más de cerca las condiciones reales del sistema earthbag, se decidió adicionar una fila de alambre de espinos, colocado entre los dos testigos, para dos de los ensayos a compresión: uno para el material estabilizado y otro para el no estabilizado (Ensayo C1 y T4 respectivamente).



Figura 32: Ensayo compresión no confinada: pila de dos sacos con alambre de espinos. Fuente: Autor.

4.3. Ensayo de resistencia al corte

El coeficiente de fricción de las interfaces earthbag, puede determinarse mediante un ensayo de corte directo en un aparato de caja para muestras grandes. Sin embargo, como no se contaba con un equipo de esas características en el laboratorio, se optó por diseñar un método alternativo que se detalla a continuación.

4.3.1. Método 1

El método ideado consistió en diseñar una pieza ajustable a la Prensa Universal de Ensayos, en cuya parte inferior se soldó una platina con un ángulo inclinado de 45°, el cual se apoyaba en el extremo superior izquierdo de la pila de dos sacos de earthbag. También se fabricó otra platina de acero, que servía de base para el par earthbag a testear, en cuyo extremo derecho se soldó una pieza perpendicular, para restringir el movimiento horizontal del saco earthbag inferior.

Mediante tornillos, esta pieza se fija a la base de la prensa y sobre ella se dispuso la pila de dos earthbag (ver Figura 32). Posteriormente se colocaba una masa sobre la pila earthbag que cumplía dos funciones: ejercer una presión normal constante al sistema y restringir el desplazamiento vertical del conjunto (la masa se iría aumentando para cada prueba).

Dos sensores *Strain Smart 5000* se instalaron en el extremo derecho del testigo superior de la pila, uno en el eje longitudinal para medir el desplazamiento horizontal y otro normal a este, para vigilar que no se produjera un desplazamiento vertical.

Hecho el montaje, se procedió con el ensayo cargando el sistema a una frecuencia de carga de 5mm/min.

Finalmente, de acuerdo con el modelo de fricción de Coulomb (véase Ec. 3.12) y haciendo el equilibrio de fuerzas pertinentes se tendría la ecuación (4.3), que describiría esfuerzo de fricción para el modelo.

$$F \cos \beta = (F \sin \beta + mg) \cdot \tan \varphi \quad (4.3)$$

$$\text{con} \quad \mu = \tan \varphi = \text{coef. fricción}$$

$$\beta = 45^\circ = \text{ángulo de la platina}$$

$$m = \text{Masa colocada sobre el conjunto}$$



Figura 33: Montaje ensayo de resistencia al corte, Método 1 (Propuesta). *Fuente:* Autor.

Al efectuarse el ensayo de prueba, sucedieron dos hechos que llevaron a desestimar este método para el cálculo del esfuerzo cortante del sistema earthbag, hechos que se describen a continuación. Primero, al iniciarse la carga, el extremo izquierdo de la probeta earthbag comenzó a deformarse notoriamente, tomando la forma inclinada de la platina. El incremento de carga no se detuvo y se siguió aumentando a la espera de lograr el deslizamiento horizontal entre las probetas, hecho que no llegó a producirse. Con el aumento de la carga, la pieza de la platina angulada comenzó a deslizar respecto del saco superior, y este comenzó a levantarse verticalmente en el extremo derecho (ver Figura 34).



Figura 34: Imagen donde se muestra el fallo producido por el ensayo de resistencia al corte, Método 1 (Propuesta).
Fuente: Autor.

4.3.2. Método 2

Desestimado el método 1, se optó por un ensayo más sencillo basado en el ensayo de corte directo, consistente en cargar horizontalmente con un gato hidráulico el earthbag superior, mientras se aplica una carga normal constante al conjunto earthbag (ver Figura 35). La dirección de corte fue en el eje longitudinal de las bolsas y se testearon las muestras en seco.

El programa consideró ensayos de muestras estabilizadas y no estabilizadas, con y sin alambre de espino, para diversas cargas normales aplicadas, tal y como se observa en la Tabla 7.

Ensayo	Muestra		Fuerzas Normales Aplicadas [kN]					
1	No Estabilizada	(sin espino)	1,5	2	2,5	3,4	3,9	4,4
2	No Estabilizada	(con espino)	1,5	4,9				
3	Estabilizada	(con espino)	1,5	4,9				

Tabla 7: Programa de ensayo a cortante. Fuente: Autor.

Para las muestras con alambre de espino, la falla a cortante se producirá cuando el material de la bolsa empieza a desgarrar, debido al deslizamiento mas allá de las púas del alambre.

Se espera que el alambre de púas mejorará la resistencia al corte y proporcionara una cohesión inicial entre las bolsas.

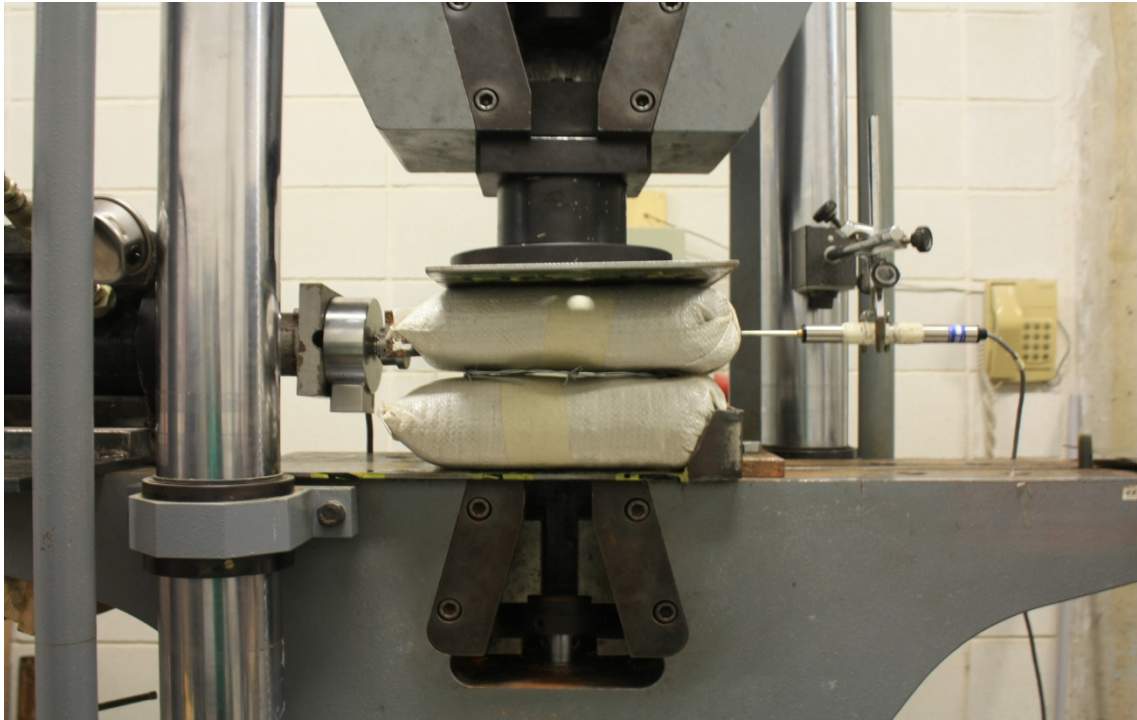


Figura 35: Montaje ensayo de resistencia al corte con espino (Método 2). *Fuente:* Autor

Para el ensayo se utilizó un gato hidráulico de las siguientes características:

Gato ENERPAC, P84 A0199C.
Max 10.000 psi, 700 bar.

Para medir el desplazamiento en el eje de cizalle, se utilizó un sensor *Strain Smart 5000* que se ubicó en la parte final del testigo superior de la pila earthbag.

En la Figura (36) se observa cómo se dispuso el alambre de espino en la interface de los testigos earthbag.

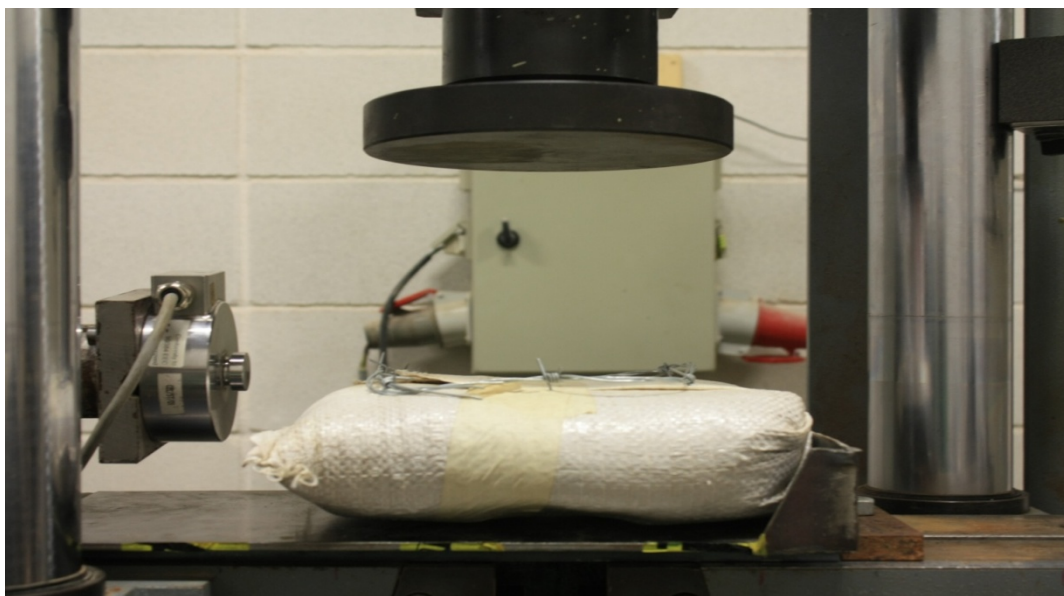


Figura 36: Disposición de alambre de espino, ensayo de resistencia al corte (Método 2). *Fuente:* Autor.

5. CAPITULO V. Análisis de resultados

5.1. Ensayo de resistencia a compresión

En la Figura (37) se muestran los resultados obtenidos para los cuatro ensayos de compresión no confinada realizadas para las pilas de 2 sacos de altura con material de relleno no estabilizado. En ella se aprecian grandes desplazamientos verticales hasta que se produce la falla por rotura del material de la bolsa. Tras la rotura inicial, la capacidad de carga disminuye.

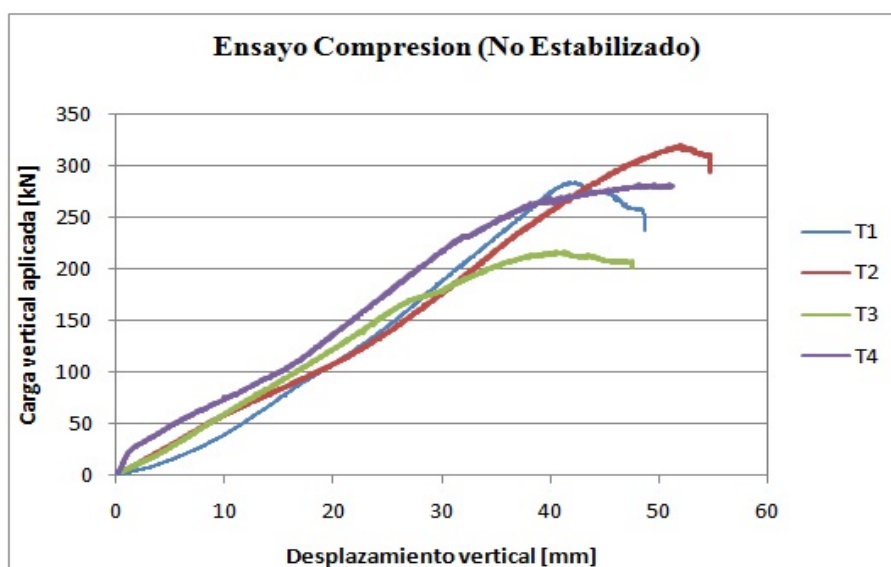


Figura 37: Carga aplicada v/s Desplazamiento pila 2-bolsas, sin estabilizar. Ensayo compresión no confinada.

La respuesta de carga-desplazamiento para los diferentes ensayos es bastante similar. El ensayo T4 que tenía alambre de espinos entre los sacos, no arroja una diferencia marcada respecto a los otros ensayos, lo que hace pensar que el alambre de espinos no sería un factor determinante para resistencia a compresión de las estructuras de earthbag. Se considera que el alambre de espinos mejora la facilidad de construcción.

En la Figura (38) se tienen los resultados para los ensayos de compresión no confinada de las pilas de 2 sacos de altura con material de relleno estabilizado. Al igual que en los ensayos de las probetas no estabilizadas se observan grandes desplazamientos verticales. Respecto a la adición de cemento a la muestra de suelo de Santa Coloma del Farnés, no se observó mejoras considerables en las resistencias a compresión respecto de las probetas no estabilizadas. Esto puede deberse a dos factores. El cemento requiere de 28 días para alcanzar sus propiedades de resistencia, y debido a la limitante de tiempo para acabar los ensayos, se dejaron secar 14 días en una estufa especial para acelerar el secado, lo que podría haber afectado el curado de la mezcla. Un segundo factor, hace relación con el tipo y cantidad de estabilizante escogido. Cuando se realizaron los ensayos, se pensaba que el material de relleno contenía un bajo porcentaje de arcillas, pero tal y como se investigó en este estudio, al repetir el ensayo del densímetro desfloculando químicamente la muestra de finos, se llegó a la conclusión que el suelo contiene un alrededor de un 20 % de arcillas (sobre el total de arena, limo y arcilla).

Por su parte, durante los ensayos se observó que al llegar a los picos de carga, la bolsa de polipropileno comenzaba el desgarre, escuchándose el sonido del mismo, y posteriormente comenzaba a decaer la carga. Lo que hace pensar que la resistencia a la compresión de los earthbag se relaciona fuertemente con la resistencia a la tracción del material de la bolsa. Tal y como comenta Pelly (2010), se cree que la resistencia a la compresión es alta, debido a las fuerzas de tracción de la bolsa que movilizan el material causando un confinamiento del suelo.

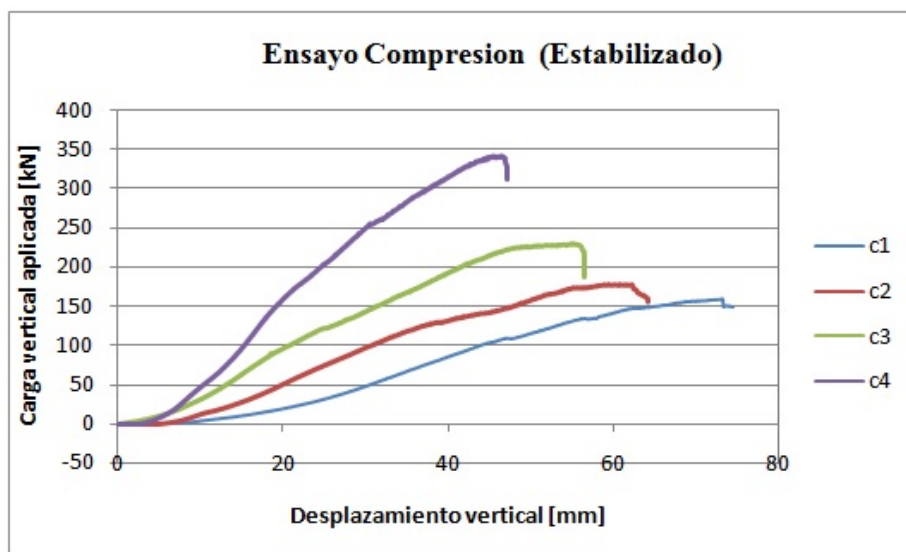


Figura 38: Carga aplicada v/s Desplazamiento pila 2-bolsas, estabilizadas. Ensayo resistencia a compresión no confinada.

Ensayo	Carga ultima aplicada	Carga última	Tensión última
	[T]	[kN]	[MPa]
C1 (espino)	17,61	159,98	2,78
C2	19,49	177,05	3,07
C3	25,28	229,66	3,99
C4	37,68	342,40	5,94
T1	31,27	284,10	4,05
T2	35,17	319,56	4,56
T3	23,81	216,39	3,09
T4 (espino)	30,98	281,52	4,02

Tabla 8: Resultados Ensayo resistencia a compresión no confinada para sistemas 2-sacos Earthbag.

La falla observada en los testigos ensayados con o sin alambre de espinos fue bastante similar, y consiste en rajaduras en las zonas de contacto entre las probetas (ver Figura 39).



Figura 39: Modo de falla de las probetas earthbag. Ensayo resistencia a compresión no confinada.

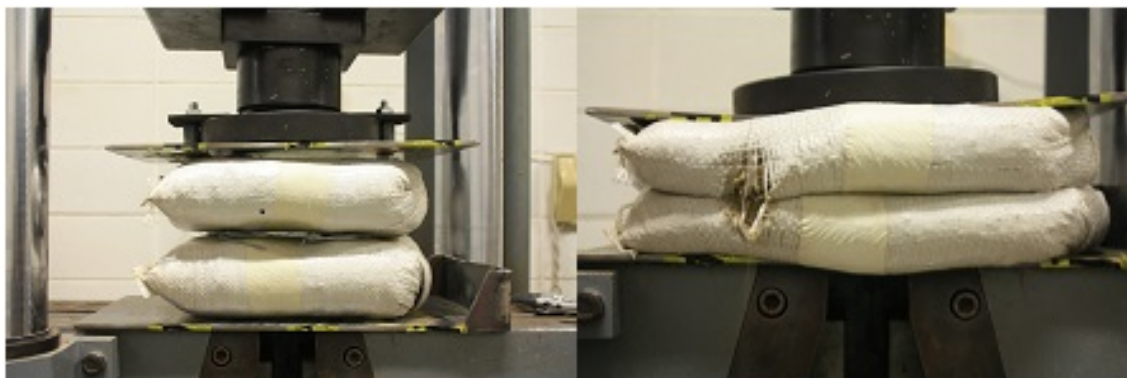


Figura 40: Deformación de la platina superior durante el ensayo de resistencia a compresión.

Para realizar la prueba a compresión, se adaptaron dos placas rectangulares rígidas a la prensa hidráulica a fin de asegurar una distribución uniforme de la carga. Sin embargo, durante los ensayos se observó que los earthbag no mantienen una sección regular uniforme, es decir, se deforman irregularmente y por ende el área de contacto entre las placas y las bolsas no es uniforme. El supuesto de que no existe fricción entre la platina y la superficie tampoco resulta válido, de hecho existe una fricción significativa entre ambos, lo que se traduce en que la platina toma una proporción importante de la carga, obteniéndose una resistencia a la compresión alta no válida (resultado artificial). De hecho, durante los ensayos, la platina superior tuvo que ser cambiada ya que sufrió deformación producto de las altas cargas (espesor muy pequeño).

Finalmente, los valores obtenidos de las resistencias promedio a compresión para las muestras earthbag estabilizadas y no estabilizadas, son de 4,33 MPa y 3,90 MPa (para las probetas ensayadas sin alambre de espino entre las interfaces). Estos valores doblarían en magnitud a los encontrados por Pelly (2010), hecho que se atribuiría a la sobreestimación de la resistencia producto de ensayar una pila de poca altura y a la posible carga que tomaría la platina de acero. Sin embargo, considerando el número de variables implicadas, tales como la composición del material de relleno, el material de la bolsa, la altura de la pila y la precisión de los equipos utilizados, se demuestra que existe una cierta consistencia en la metodología de ensayo aplicada.

5.2. Ensayo de resistencia al corte

El coeficiente de fricción de las interfaces earthbag se determino mediante el ensayo de corte directo descrito en el capítulo de procedimiento experimental (método 2).

Como se menciona en el capitulo anterior, se testearon muestras estabilizadas y no estabilizadas, con y sin alambre de espino para diversas cargas normales (Tabla 7, cap. 4.3.2).

La configuración sin alambre de espinos presentó una buena capacidad de repetición de pruebas, mientras que las con alambre fueron mucho más pobres. Así, las muestras con alambres de espino sólo se ensayaron para dos cargas normales, ya que al deslizarse se producía la rasgadura del material de la bolsa, ensayándose por una cara para la primera carga y para la siguiente carga por el reverso (se voltearon).

La tabla siguiente muestra los resultados obtenidos de las pruebas de resistencia al corte para las muestras earthbag.

Ensayo	Muestra		Cohesión	Coef. Fricción [tan ϕ]	Angulo Fricción [ϕ]
1	No Estabilizada	(sin espino)	0	0,52	27,4
2	No Estabilizada	(con espino)	0,294	0,70	35,0
3	Estabilizada	(con espino)	1,204	0,11	6,5

Tabla 9: Resumen de resultados, Ensayo de corte.

Las Figuras 43 a 45 muestran la relación lineal entre la fuerza normal aplicada versus la fuerza de fricción para las muestras analizadas. De ellas se deduce el coeficiente de fricción que corresponde a la pendiente de la línea de tendencia y la cohesión (intersección eje y).

Teóricamente la configuración sin alambre en la interfaz entre los sacos no debe presentar cohesión, por lo que se obliga a pasar la línea de tendencia por el origen.

El valor del coeficiente de fricción de las interfaces de earthbag obtenido para las muestras no estabilizadas fue mayor para la configuración con alambre de espinos (0,70) que para la sin alambre de espinos (0,52). Estos resultados son de un orden de magnitud similar a los obtenidos por Pelly (2010) y Vadgama (2010). Pelly encontró un coeficiente de 0,43 para la configuración sin alambre y 0,66 con alambre de espinos, mientras que Vadgama obtuvo valores de 0,43 y 0,67 respectivamente. Sin embargo se debe recordar que dichas investigaciones utilizaron arena como material de relleno, por lo que no está claro aún si es del todo apropiada la comparación.

Respecto al ensayo a cortante para las muestras estabilizadas con cemento, los valores obtenidos no se consideran validos ya que tras el ensayo se observo que sería más apropiado haber colocado el alambre de espinos entre las probetas antes del secado y no después, tal y como se hizo, que representaría de un modo más cercano a lo que sucede en una construcción real con earthbag.

Tal y como describe Vadgama (2010) en su estudio, la resistencia al corte mejorada proporcionada por las púas del alambre de espinos dependería de varios factores tales como la densidad del suelo, resistencia y rigidez de las púas del alambre, la orientación y enganche de las púas entre los sacos y la correcta penetración en el material del earthbag. Sin embargo en la realidad, cuando se construye con earthbag estos factores son fácilmente descuidados, por lo tanto la posible eficacia del alambre se reduce. En la práctica, se aprecia que el uso del alambre de espinos es beneficiosos durante la construcción, ya que proporciona una aparente cohesión

entre las bolsas que resisten las fuerzas de corte generadas a partir del apisonamiento de los earthbag, que evita que estos deslicen producto de esta acción. Con los ensayos efectuados en este estudio no queda del todo claro su contribución real a la resistencia a cortante de las estructuras earthbag.



Figura 41: Ensayo de corte entre dos probetas earthbag con alambre de espino en el interfaz de las bolsas.



Figura 42: Modo de fallo al corte para probetas Earthbag para configuración con alambre de espinos.

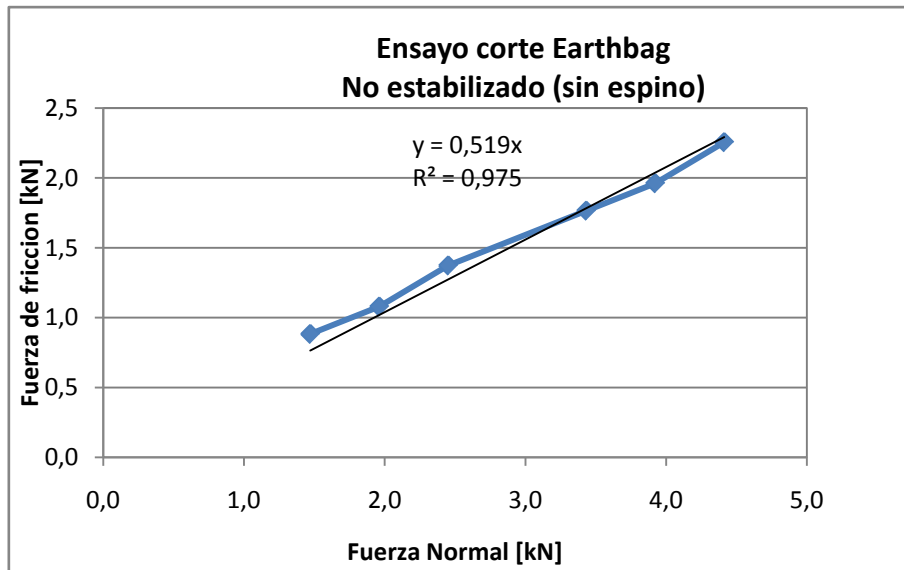


Figura 43: Fuerza de fricción v/s Fuerza normal, muestras sin estabilizar (sin espino).

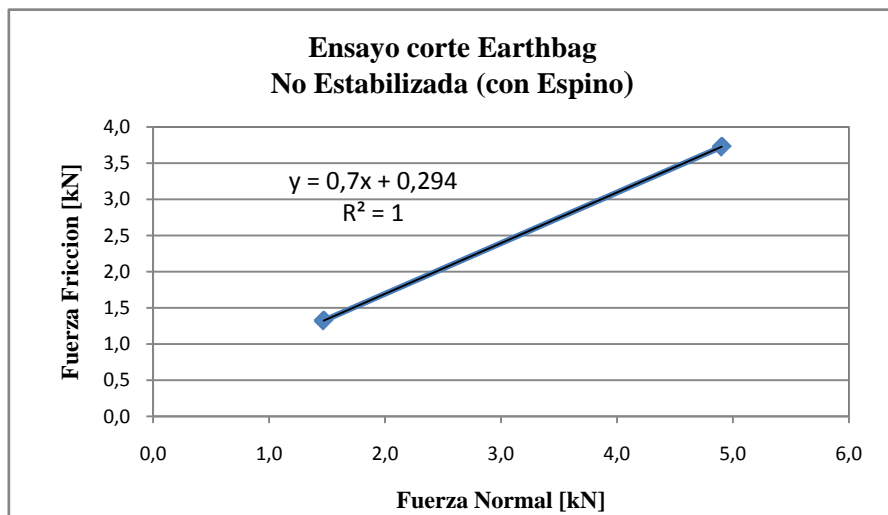


Figura 44: Fuerza de fricción v/s Fuerza normal, muestras sin estabilizar (Con espino).

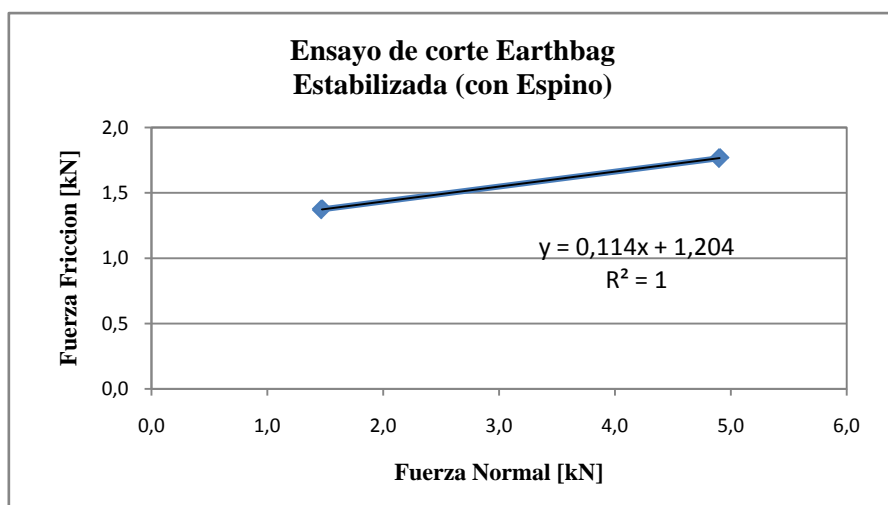


Figura 45: Fuerza de fricción v/s Fuerza normal, muestras estabilizadas (sin espino).

6. CAPITULO VII. Conclusión

La técnica earthbag es un método constructivo relativamente nuevo y poco estudiado hasta la fecha, que podría representar una alternativa eficaz y viable para la construcción de viviendas en el mundo, dada su sencillez de ejecución, su bajo costo e impacto medioambiental.

La investigación ha incluido ensayos de laboratorio para analizar el comportamiento de las estructuras earthbag bajo cargas a compresión y corte, para ampliar el campo de conocimiento de esta técnica y crear estructuras seguras, resistentes y eficientes. Estos ensayos sientan un precedente para futuros análisis de estructuras earthbag, sin embargo aun hay muchos escenarios de carga, tipos de materiales y geometría de diseño por investigar.

La metodología de ensayo puede evaluarse críticamente a través de la inspección de los resultados y es innegable que los dos tipos de pruebas de resistencia aquí evaluados pueden mejorarse. La primera inadecuación se puede encontrar en el diseño general de los experimentos. Por simplicidad de ejecución y restricciones de maquinaria de ensayo apropiada, pequeñas dimensiones se adoptaron (tamaño de los sacos y altura de la pila) que podrían traducirse en resultados no valederos. El número de pruebas es otro factor a tener en cuenta, se requiere un número mayor de repeticiones de los mismos a fin de conseguir valores confiables. Para los ensayos se prepararon 22 probetas cada una de 6 kilos de tierra (húmedos) aproximadamente, que hacían un total de 132 kilos de material¹⁴, que pese a parecer una cantidad apropiada se queda corta a la hora de repetir las pruebas. Por ejemplo, en los ensayos de corte con alambre de espinos, la rajadura de los sacos impedía la reutilización de las mismas para poder testearlas a una mayor cantidad de cargas normales, siendo esto una limitante.

A pesar de las críticas resaltadas anteriormente, los resultados obtenidos para el ensayo de resistencia bajo carga axial para la pila earthbag son satisfactorios y se concluye que es poco probable que las estructuras earthbag fallen por compresión. Las resistencias promedio a compresión para las muestras earthbag estabilizadas y no estabilizadas, fueron de 4,33 MPa y 3,90 MPa (para las probetas ensayadas sin alambre de espino entre las interfaces), valores que doblarían en magnitud a los encontrados por investigaciones similares como la de Pelly (2010) pero que sin embargo no son del todo comparables ya que el material de relleno utilizado en dicho estudio era arena, material con propiedades muy diferentes a la tierra de Santa Coloma que se utilizó en este estudio. Esta sobreestimación de la resistencia se podría atribuir a la baja altura de la pila ensayada y/o a la posible carga que tomaría la platina de acero. De estos ensayos también se deduce que no existe influencia en la resistencia a compresión de los earthbag por la inclusión o no de los alambres de espinos. Donde sí se encontró una influencia es respecto al material de la bolsa, ya que se observó una relación directa entre la resistencia a tracción del material de la bolsa y el fracaso a compresión. En los ensayos, fue perceptible auditivamente la rajadura del material de los sacos justo al momento de producirse la bajada de tensión en la curva de carga (momento de falla). Respecto al modo de fallo bajo carga vertical, este consiste en rajaduras en las caras superiores e inferiores de los earthbag (zona de contacto), por lo que el material de la bolsa llega a su capacidad máxima de tracción sólo en estos puntos. En general, se concluye que los earthbags exhiben comportamiento de bloque a bajas tensiones, y se comportan como suelo cuando las tensiones se acercan al pico de estrés. Sin embargo no es posible con la investigación realizada determinar una dimensión precisa del earthbag, lo que crea un nivel de incertidumbre en el sistema.

Esta investigación también ha demostrado que, la estimación del coeficiente de fricción de las interfaces earthbag basado en la ley de coulomb es adecuado. Se obtuvo un valor del coeficiente de 0,70 para las muestras con alambre de espinos y de 0,52 para las sin alambre, lo que

¹⁴ Realmente, en total se prepararon 30 probetas, sin embargo 8 de ellas se "sacrificaron" en ensayos de pruebas previos a los oficiales.

denotaría que la inclusión del alambre de espinos mejora el coeficiente de fricción entre los sacos earthbag y le otorga a su vez una cohesión inicial al conjunto. Sin embargo, la resistencia al corte mejorada proporcionada por las púas del alambre de espinos dependería de varios factores tales como la densidad del suelo, resistencia y rigidez de las púas del alambre, la orientación y enganche de las púas entre los sacos y la correcta penetración en el material del earthbag, factores que no han sido posibles de evaluar con los ensayos efectuados en esta investigación. Todo parece indicar que el alambre de espinos no contribuye a un mejor desempeño estructural a cortante, más bien su uso sería de utilidad durante el proceso constructivo ya que otorga una cierta cohesión e impide el deslizamiento entre las hiladas mientras se está compactando.

Finalmente, considerando el número de variables implicadas, tales como la composición del material de relleno, el material de la bolsa, la altura de la pila y la precisión de los equipos utilizados, se puede decir que este trabajo es una contribución a la base de conocimientos sobre el comportamiento de las estructuras earthbag y permite desarrollar una imagen más fiable sobre esta técnica resistente, pero resulta pertinente de todos modos seguir ampliando la investigación en la materia para llegar a un diseño que pueda ser avalado por la comunidad científica.

6.1. Trabajo Futuro

La escasa investigación en campo de la construcción de estructuras earthbag, es un motivo para seguir trabajando en la materia, específicamente en lo que a ingeniería estructural se refiere. Sobre la base de la labor realizada en este trabajo, hay una serie de factores que pueden ser enfocados en el trabajo futuro.

En este estudio, se desarrollaron ensayos de laboratorio, que pese a valorarse metodológicamente deben ser mejorados para poder desestimar errores experimentales. Interesante sería poder probar más tipos de rellenos y estabilizantes como por ejemplo la cal. La altura de la pila earthbag también es un factor a analizar, ya que como se vio en esta y en anteriores investigaciones (Pelly, 2010; Vadgana 2010), pilas pequeñas sobreestimarían las resistencias a carga vertical.

La característica estructural más probada de los earthbags es la resistencia a la compresión, sin embargo investigaciones de corte y flexión en paredes earthbag deben desarrollarse para poder acercarse más al comportamiento estructural real de los earthbag. Las construcciones earthbag comúnmente corresponden a estructuras curvas (tales como cúpulas), desarrollar estudios que analicen la forma geométrica arquitectónica junto con la resistencia sería meritorio, ya que las paredes de forma curva conllevan diferentes características de resistencia bajo carga lateral. La arquitectura vernácula de tierra a menudo adopta formas con un buen desempeño estructural, para las construcciones earthbag se debe tener en cuenta también este enfoque a fin de diseñar estructuras earthbag eficientes.

La resistencia sísmica de las estructuras earthbag es también tema de gran interés de estudio debido a su presencia en zonas con actividad sísmica. Análisis dinámicos son sin duda un desafío, por las dificultades que presenta modelar a escala menor sin subestimar las fuerzas.

Finalmente, una de las limitaciones de este trabajo ha sido la incapacidad de probar una cúpula earthbag real y al hacerlo, tener en cuenta efectos tridimensionales. Una prueba estructural completa de una cúpula earthbag demostraría el potencial del sistema estructural, y podría desarrollar aún más las formas que factiblemente se pueden lograr con este método de construcción.

7. CAPITULO VI. Bibliografía

ASTM D422-63 (2007). Standard test method for Particle-Size Analysis of soil. In *Annual book of ASTM Standards* (Vol.04.08): *Soil and Rock* (I):West Conshohocken, PA(Am.So.Testing Mater.).

Barbeta, G. (2002). Mejora de la tierra estabilizada en el desarrollo de una arquitectura sostenible hacia el siglo XXI. Tesis doctoral, UPC, Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Barcelona.

Daigle, B. (2008). Earthbag Housing: Structural Behaviour and Applicability in Developing Countries. Thesis (M.Sc.) Queen's University, Kingston, Ontario, Canada.

Dunbar, R. (2006). *Prism Test of Earthbags*. Undergraduate Research. West Point Military Academy.

Hunter, K., Kiffmeyer, D. (2004). *Earthbag building - The Tools, Tricks and Techniques*. Canada: New Society Publishers.

Khalili, N. (2008). Emergency sandbag shelter & Ecovillage. Hesperia: Cal-Earth Press.

Massó F. (2013). Millora de la Tàpia mitjançant l'ús d'encenalls de suro natural; un àrid amb propietats tèrmiques. TFG, Universitat de Girona.

Masso F., Barbeta G. (2014). Thermal improvement of rammed earth buildings by the inclusion of natural cork. *Earthen Architecture. Past, present and future*. Mileto, Vegas, García Soriano & Cristini (Eds).Taylor & Francis Group. London, 2014, pp. 37-42.

Minke G. (1994). *Manual de construcción en tierra: la tierra como material de construcción y su aplicación en la arquitectura actual*. Teruel: EcoHabitar D.L.

Pelly, R. (2010). Plastic limit analysis of earthbag structures. Dissertation (M.Eng.). University of Bath, Department of Architecture and Civil Engineering.

UNE 103 102 (1995). Análisis granulométrico de suelos finos por sedimentación. Método del densímetro. Madrid: AENOR.

Vadgama, N. (2010). A Material and Structural Analysis of Earthbag Housing. Dissertation (M.Eng.). University of Bath, Department of Architecture and Civil Engineering.

Xu, Y., Jian, H., Yanjun, D. and De-an, S. (2008). Earth reinforcement using soilbags. *Geotextiles and Geomembranes*, 26 (3), pp.279-289.

8. ANEXO

8.1. Ensayo de sedimentación (Sedimentometría)

A continuación se presentan las tablas para el cálculo de la curva granulométrica de suelos finos mediante el método de sedimentación.

Profundidad efectiva L (Hidrometro ASTM 152H)			
Lectura real	L efectiva [cm]	Lectura real	L efectiva [cm]
0	16,30	31	11,17
1	16,10	32	11,00
2	16,00	33	10,83
3	15,83	34	10,67
4	15,67	35	10,50
5	15,50	36	10,33
6	15,33	37	10,17
7	15,17	38	10,00
8	15,00	39	9,83
9	14,83	40	9,67
10	14,67	41	9,50
11	14,50	42	9,33
12	14,33	43	9,17
13	14,17	44	9,00
14	14,00	45	8,83
15	13,83	46	8,67
16	13,67	47	8,50
17	13,50	48	8,33
18	13,33	49	8,17
19	13,17	50	8,00
20	13,00	51	7,83
21	12,83	52	7,67
22	12,67	53	7,50
23	12,50	54	7,33
24	12,33	55	7,17
25	12,17	56	7,00
26	12,00	57	6,83
27	11,83	58	6,67
28	11,67	59	6,50
29	11,50	60	6,33
30	11,33	61	6,17

Tabla 10: Profundidad efectiva L. *Fuente:* Barbeta (2002).

Valores de K (Ley de Stock)								
Temperatura °C	Peso específico [gr/cm3]							
	2,5	2,55	2,6	2,65	2,7	2,75	2,8	2,85
16	0,0151	0,0148	0,0146	0,0144	0,0141	0,0139	0,0137	0,0136
17	0,0149	0,0144	0,0144	0,0142	0,0140	0,0138	0,0136	0,0134
18	0,0148	0,0143	0,0142	0,0140	0,0138	0,0136	0,0134	0,0132
19	0,0145	0,0143	0,0140	0,0138	0,0136	0,0134	0,0132	0,0131
20	0,0143	0,0141	0,0139	0,0137	0,0134	0,0133	0,0131	0,0129
21	0,0141	0,0139	0,0138	0,0135	0,0133	0,0131	0,0129	0,0127
22	0,0140	0,0137	0,0136	0,0133	0,0131	0,0129	0,0128	0,0126
23	0,0138	0,0136	0,0135	0,0132	0,0130	0,0128	0,0126	0,0124
24	0,0137	0,0134	0,0134	0,0130	0,0128	0,0126	0,0125	0,0123
25	0,0135	0,0133	0,0132	0,0129	0,0127	0,0125	0,0123	0,0122
26	0,0133	0,0131	0,0129	0,0127	0,0125	0,0124	0,0122	0,0120
27	0,0132	0,0130	0,0128	0,0126	0,0124	0,0122	0,0120	0,0119
28	0,0130	0,0128	0,0126	0,0124	0,0123	0,0121	0,0119	0,0117
29,00	0,0129	0,0127	0,0125	0,0123	0,0121	0,0120	0,0118	0,0116
30,00	0,0128	0,0126	0,0124	0,0122	0,0120	0,0118	0,0117	0,0115

Tabla 11: Valores de K para el cálculo del diámetro de la partícula D (Ley de Stock). *Fuente:* Barbeta (2002).

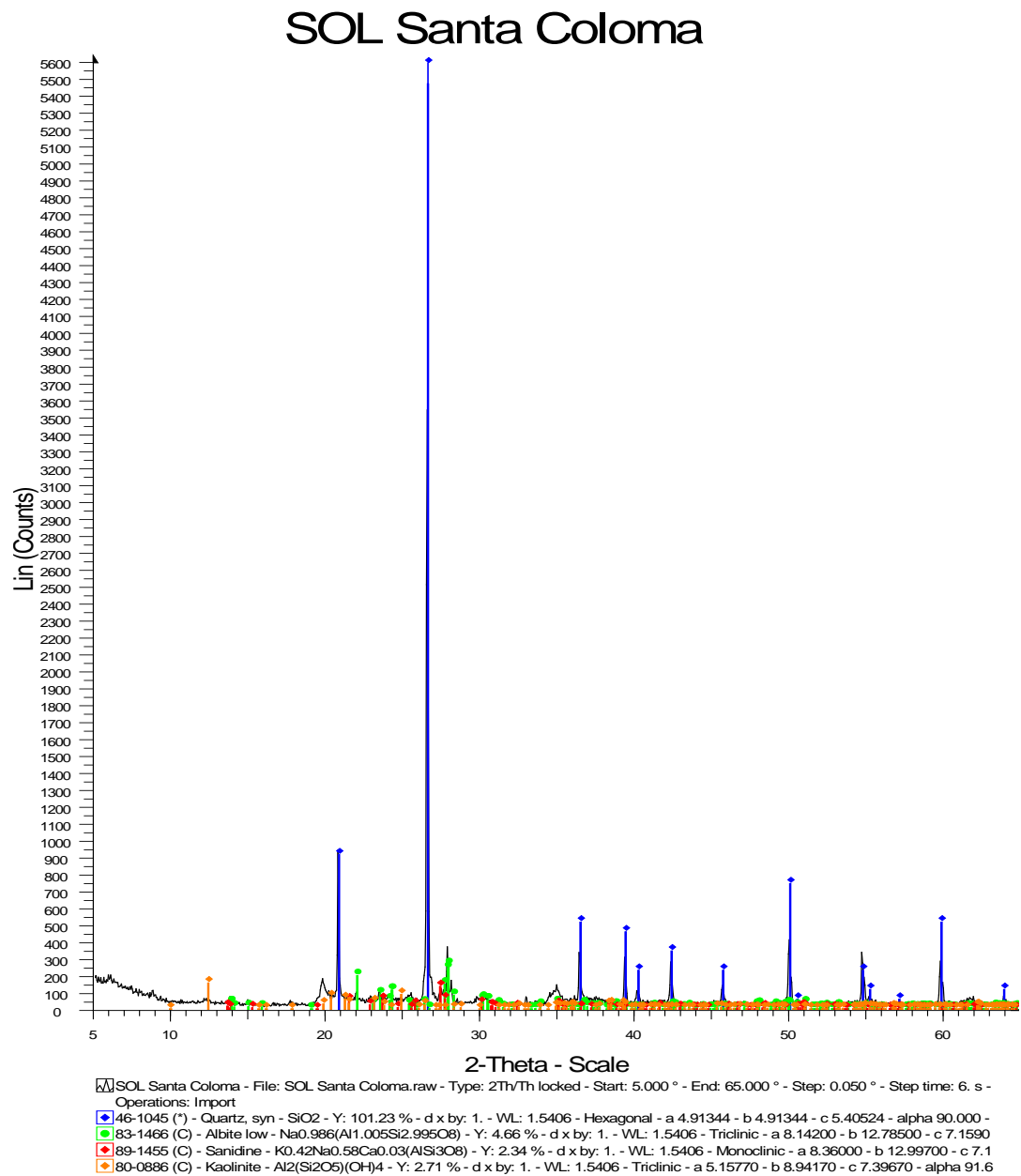


Figura 46: Resultado ensayo difracción de rayos X (DRX). *Fuente:* Masso *et al* (2014).

8.2. Ensayo compresión no confinada

	Ensayo	Muestra	H [mm]	B [mm]	L 1 [mm]	L2 [mm]	L [mm]	Masa seca [kg]	Contenido Humedad [%]
Estabilizadas	C1	C1a	75	220	260	240	250,0	5,64	6,38
		C1b	70	225	265	250	257,5	5,64	6,38
	C2	C2a	75	220	260	230	245,0	5,66	6,01
		C2b	69	225	265	235	250,0	5,68	5,63
	C3	C2a	65	220	265	240	252,5	5,66	6,01
		C2b	70	230	265	250	257,5	5,66	6,01
	C4	C2a	60	230	280	250	265,0	5,64	6,38
		C2b	57	230	280	250	265,0	5,66	6,01
NO Estabilizadas	T1	T1a	45	230	330	300	315	5,9	1,69
		T1b	50	230	325	295	310	5,88	2,04
	T2	T2a	55	225	315	275	295	5,86	2,39
		T2b	55	225	325	285	305	5,88	2,04
	T3	T3a	45	230	330	295	312,5	5,86	2,39
		T3b	50	230	335	300	317,5	5,86	2,39
	T4	T4a	55	230	320	275	297,5	5,88	2,04
		T4b	50	230	320	280	300	5,86	2,39
	Promedio		67,63	225,00	267,50	243,13	255,31	5,66	6,10
	Promedio		50,63	228,75	325,00	288,13	306,56	5,87	2,17

Tabla 12: Características probetas ensayo compresión confinada.